

Agosto 2019 • N.º 515 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

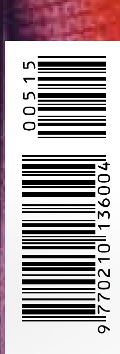
La gran explosión de la vida

Nueva luz sobre el auge de la diversidad animal

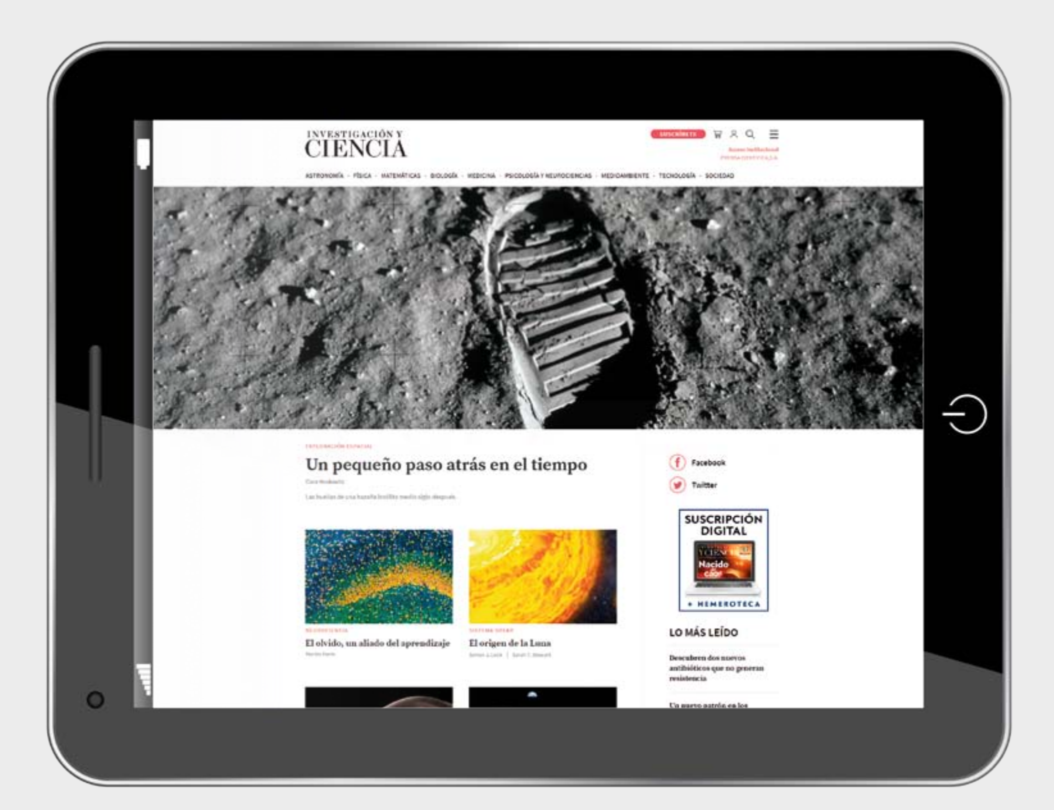
MEDIOAMBIENTE
Contaminación atmosférica y salud humana

FÍSICA
El transporte de calor a escala nanométrica

MEDICINA
Efectos cerebrales de la cirugía bariátrica



¡NUEVA PÁGINA WEB!



Más contenidos de acceso abierto

Presentación más atractiva

Web optimizada para todos los dispositivos



Nuestra audiencia digital no deja de crecer, respaldada por más de **425.000** seguidores en Twitter, **140.000** en Facebook y más de **75.000** suscriptores de nuestros boletines temáticos.



¡SÍGUENOS!

INVESTIGACIÓNYCIENCIA.ES



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Agosto 2019, Número 515

ARTÍCULOS

BIOLOGÍA EVOLUTIVA
18 El auge de los animales
Nuevos hallazgos fósiles y datos recientes sobre las características químicas de los antiguos océanos revelan las profundas raíces de la explosión cámbrica.
Por Rachel A. Wood

FÍSICA NUCLEAR
26 El último secreto del átomo
Los físicos aún desconocen el origen de la masa y el espín del protón. Un ambicioso proyecto aspira a cartografiar con detalle el interior de esta partícula para averiguarlo.
Por Abhay Deshpande y Rikutaro Yoshida

SALUD AMBIENTAL
34 Contaminación atmosférica y salud pública
Los efectos de la polución en la salud suelen ser difíciles de observar a nivel individual. ¿Cómo puede mejorarse ese conocimiento y aumentar la concienciación de la población ante el problema? *Por Mark J. Nieuwenhuijsen*

CLIMA
50 Viene mal tiempo
Los últimos desastres naturales demuestran que las tormentas invernales, lluvias torrenciales y olas de calor estivales se intensifican debido al cambio climático.
Por Jennifer Francis

NANOCIENCIA
58 El calor a escala nanométrica
Durante doscientos años los físicos han descrito el transporte de calor mediante la ley de Fourier. Ahora, los avances en nanotecnología demandan una comprensión más sutil del fenómeno. *Por Olivier Bourgeois, Dimitri Tainoff, Natalio Mingo, Bjorn Vermeersch y Jean-Louis Barrat*

INMUNOLOGÍA
66 Reinventar las vacunas
Una controvertida teoría sostiene que una sola vacuna, administrada de forma apropiada, puede proteger contra muchas más enfermedades que la que pretende evitar. *Por Melinda Wenner Moyer*

NEUROCIENCIA
74 Los otros efectos de la cirugía bariátrica
Nuevos estudios revelan que la intervención quirúrgica modifica la microbiota intestinal y las conexiones enterocerebrales. Ello abre nuevos caminos para el tratamiento de la obesidad. *Por Bret Stetka*





INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
¿Por qué los tiburones huyen en desbandada? La basura espacial se amontona. Ríos apresados. Risa amistosa. El secreto del pájaro mosquero. Un respirador que podría salvar vidas. Resonancias cerebrales más sensibles. Luz UV para salvar aves.

11 Agenda

12 Panorama
Condensadores con capacidad negativa. *Por Pablo García-Fernández y Javier Junquera*
Reinventar el combustible nuclear. *Por Rod McCullum*

42 De cerca
Insectos palo que se hacen notar. *Por François Savatier*

44 Historia de la ciencia
Las mujeres de la tabla periódica.
Por Brigitte van Tiggelen y Annette Lykkness

47 Foro científico
Los últimos océanos inalterados.
Por Kendall Jones y James Watson

80 Curiosidades de la física
Ondas cobra con palillos. *Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik*

84 Correspondencias
La ciencia de Benjamin Franklin.
Por José Manuel Sánchez Ron

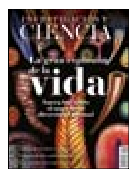
89 Juegos matemáticos
El conjunto de Cantor. *Por Bartolo Luque*

92 Libros
La leche en la historia humana. *Por Luis Alonso*
Los límites de lo real a través de la fantasía.
Por Bartolo Luque
¿Deberían tener derechos los robots?
Por Pablo Jiménez Schlegl

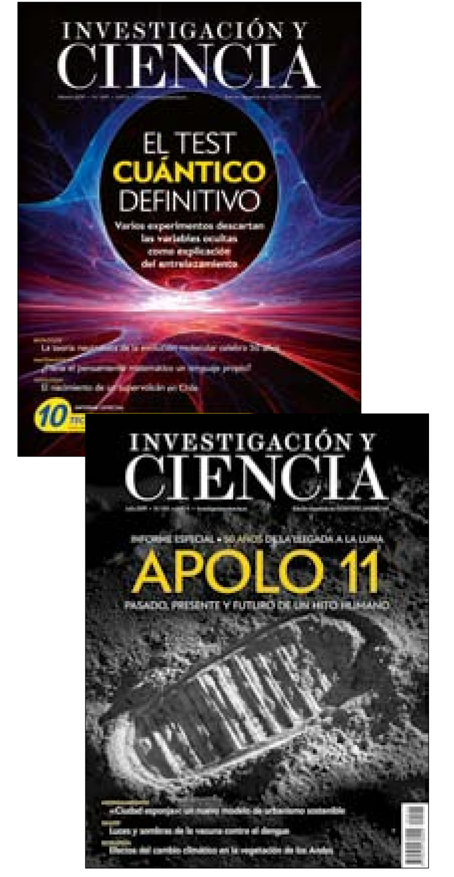
96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

El registro fósil revela que la evolución animal se había acelerado millones de años antes de la explosión cámbrica. Los organismos del período Ediacárico anterior ya estaban evolucionando hacia formas depredadoras, creaban esqueletos protectores y formaban ecosistemas de arrecifes, entre otros avances que precedieron a la diversificación cámbrica. Ilustración de Franz Anthony.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero y julio de 2019

INTERIOR ENIGMÁTICO

En «Un pulsar de 2,3 masas solares» [Investigación y Ciencia, febrero de 2019], Manuel Linares, Tariq Shahbaz y Jorge Casares explican cómo la masa de estos astros puede ayudar a entender su composición interna. Además de los púlsares, otro tipo de estrellas de neutrones son los magnetares. ¿Cabe esperar que púlsares y magnetares tengan una constitución interna diferente? ¿Podrían los experimentos con materia nuclear llevados a cabo en algunos laboratorios, como el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) de Brookhaven, ayudar a entender el interior de estos astros? Por último, se cree que la vida activa de algunos magnetares es de tan solo unos 10.000 años. Una vez «apagados», ¿podrían estos objetos dar cuenta de una fracción de la materia oscura de las galaxias?

Juan Torras Suriol
Terrassa, Barcelona

Responde Linares: *No, los magnetares son estrellas de neutrones con campos magnéticos muy intensos, por lo que su composición interna debería ser muy parecida a la del resto de las estrellas de neutrones. En cuanto a los experimentos en aceleradores, estos proyectos investigan materia muy densa pero con temperaturas mucho más elevadas que las que cabe esperar en el interior de una estrella de neutrones. Por último, es posible que estos objetos pudieran explicar una fracción muy pequeña de la materia oscura, pero sabemos por distintas observaciones que no pueden dar cuenta de toda la materia oscura existente en las galaxias.*

LA COMPLEJIDAD DE LAS PSEUDOTERAPIAS

En «Comprender el pluralismo médico» [Investigación y Ciencia, julio de 2019], Enrique Perdiguero explica y defiende la integración de la medicina científico-experimental con la medicina tradicional y la medicina alternativa o complementaria. Sin embargo, creo muy importante destacar que en ningún caso se pueden vender tratamientos tradicionales o alternativos como panaceas, como muchas veces ocurre, y mucho menos cuando estos se basan únicamente en creencias o tradiciones y no en hechos empíricos.

Las pseudociencias se apoyan muchas veces en estas medicinas y se aprovechan de la desesperación de los pacientes o de sus familiares para atracarlos, vendiéndoles placebos como curas milagrosas y enmascaradas como medicina tradicional, alternativa o complementaria. Está bien que si crees que oler un limón cura el cáncer lo hagas (igual hasta te ayuda a sentirte mejor), pero hay que vigilar muy de cerca que no se empiecen a vender limones en las farmacias a cientos de euros.

Pablo Rodríguez
Gijón, Asturias

Responde Perdiguero: *Lamento no haber sido lo suficientemente claro en mi escrito. En ningún caso pretendo defender la integración de la medicina científico-experimental con las medicinas tradicionales o alternativas. El texto pretende fijar la posición de la OMS al respecto, teniendo en cuenta que este organismo tiene una perspectiva global sobre la cobertura asistencial. También pretende aportar herramientas conceptuales, provenientes de las ciencias sociales, para comprender por qué en los países ricos algunas personas acuden a las medicinas alternativas y complementarias (MAC).*

Las autoridades científicas y sanitarias deben proteger a los ciudadanos ante cualquier producto o procedimiento que pueda resultar dañino para la salud o que prometa propiedades terapéuticas no probadas. Pero, para tratar de evitar comportamientos que puedan resultar nocivos, hemos de utilizar todos los recursos de las ciencias: no solo de las biomédicas, sino también de las sociomédicas. Los conceptos de pluralismo asistencial e itinerario terapéutico ayudan a situarse en la perspectiva poblacional y a entender las razones que guían su comportamiento cuando se percibe un problema de salud o se quiere mejorarla.

El manido recurso a la ignorancia y a la falta de educación de la población, usado reiteradamente, no basta para explicar el fenómeno; es necesario afinar el análisis con una mayor riqueza conceptual. En España, las rigurosas Encuestas Nacionales de Salud arrojan cifras bajas de uso de las MAC en comparación con otros países europeos igual o más desarrollados. Sin embargo, quienes más las usan son mujeres universitarias de mediana edad y con un nivel socioeconómico alto o medio-alto. Es preciso, por tanto, tratar de comprender por qué las MAC resultan atractivas para algunos segmentos de población bien informados y que gozan de buena salud.

Además, hay que situarse en la realidad europea. Los estudios financiados por la UE, como el proyecto CAMbrella, indican que las variaciones a la hora de reglamentar sobre las MAC son muy relevantes. Se trata, pues, de un problema complejo que va mucho más allá de nuestras fronteras. Hay que usar la ciencia, todas las ciencias, para estudiar el fenómeno del pluralismo asistencial. Solo así se logrará evitar que la población sufra daños o albergue falsas esperanzas.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



HASTA EL TEMIBLE JAQUETÓN pone mar de por medio cuando las orcas hacen acto de presencia.



ETOLOGÍA

¿Por qué los tiburones huyen en desbandada?

Los jaquetones abandonan las áreas de alimentación cuando las temibles orcas se acercan

Salvador Jorgensen ha dedicado más de quince años al estudio del jaquetón, o tiburón blanco (*Carcharodon carcharias*), ante las costas de California. Durante ese tiempo, este investigador del Acuario de la Bahía de Monterrey y su equipo han acoplado radiotransmisores de seguimiento a 165 de estos grandes depredadores, que suelen merodear por unos islotes enclavados al oeste de San Francisco a la caza de elefantes marinos. Un otoño sucedió algo extraño: «En 2009, diecisiete estaban nadando por los Farallones, cuando todos se esfumaron de repente. Ni uno ni dos: los diecisiete. En pocas horas», recalca. «Normalmente vagan por aquellas aguas durante semanas o meses.» ¿Por qué huyeron? Los jaquetones blancos son quizá los carnívoros más temidos del mar, pero resulta que ellos también temen a alguien: a las orcas.

Jorgensen y sus colaboradores llegaron a esa conclusión en un estudio reciente en el que combinaron los datos de seguimiento de los tiburones con casi tres décadas de censos de fauna en la isla sureste del pequeño archipiélago. Han observado que abandonan esa importante zona de alimentación cuando las orcas se acercan demasiado, aunque los cetáceos se hallen de paso y permanezcan pocas horas. Y no se esfuman durante uno o dos días, sino que se mantienen alejados la estación entera. En los años de desbandada, las capturas de elefantes marinos por los tiburones se reducen entre cuatro y siete veces. Los resultados del estudio se publicaron en abril en *Scientific Reports*.

Los tiburones aparecieron hace al menos 450 millones de años, mientras que los cetáceos (ballenas

RODRIGO FRISCIONE, GETTY IMAGES



UNA ORCA se alimenta de arenques.

y delfines) surgieron hace solo 50 millones de años. «Para sobrevivir y florecer en el mar tanto tiempo, han de tener sus trucos. Uno es saber cuándo toca retirarse», explica Jorgensen. Lo que más le sorprende es que pueda transcurrir casi un año antes de que retornen. Algunas orcas se especializan en la caza del salmón y de otros peces, otras prefieren los pinnípedos (focas y morsas) y unas terceras se decantan por los tiburones. Se tiene constancia de al menos una que dio muerte y devoró a un jaquetón adulto en los Farallones, en 1997. No está claro si los escualos evitan a las orcas por el temor a ser devorados o porque compiten por la misma presa, las focas. Sea como sea, esa gran cautela podría ser simplemente una estrategia de supervivencia.

Los jaquetones del Pacífico oriental deben disponer de otros terrenos de caza. «Hay muchos más lugares donde encontrar alimento, porque las colonias de cría de las focas están en expansión» gracias a las campañas de conservación, afirma el ecólogo Chris Lowe, de la Universidad Estatal de California en Long Beach, que no ha participado en el estudio. Que los tiburones estén dispuestos a renunciar a las presas de los Farallones es señal de que prefieren marchar a otro lugar y no afrontar el peligro, por remoto que sea, de acabar en las fauces de una orca.

No se sabe cómo detectan estos su presencia. Las aguas que bañan los Farallones son turbias, y los jaquetones las abandonan cuando sus adversarias aún están lejos de su radio de visión o escucha. Jorgensen afirma que la explicación más plausible es que «son capaces de oler algo en el agua que los alerta.» Es posible que olfateen a las propias orcas o alguna sustancia segregada por otro tiburón puesto en fuga ante el encuentro con ellas. Esta última idea goza de cierto apoyo: el equipo de Jorgensen siguió los desplazamientos de un grupo de jaquetones situado a cientos de kilómetros de los Farallones en el momento de la llegada de las orcas. Poco después de que estas se marcharan, los escualos aparecieron. «Pero se limitaron a husmear por allí un poco antes de alejarse casi de inmediato.» Quizá percibieron de algún modo su reciente presencia en las inmediaciones.

«[Los tiburones] tienen sus trucos. Uno es saber cuándo toca retirarse.»
—Salvador Jorgensen, *investigador del Acuario de la Bahía de Monterrey*

Los ecólogos suelen usar el término «paisaje del miedo» para describir el modo en que los depredadores influyen en los desplazamientos y en el comportamiento de las presas, que tiene como consecuencia una cascada de impactos en el ecosistema. Por ejemplo, en un experimento reciente, los mapaches de una isla pasaron menos tiempo buscando comida en la playa y en las charcas dejadas por la marea baja si oían el ladrido de perros. Eso se tradujo en la proliferación de peces e invertebrados (cangrejos, gusanos). Y, a su vez, derivó en un descenso de los caracoles, presa fácil para la creciente población de cangrejos.

No se sabe qué repercusión puede tener la huida de los tiburones para el ecosistema marino. «Sabemos muy poco sobre cómo interactúan estos dos superdepredadores en mar abierto», confiesa Jorgensen. El motivo radica en parte en el hecho de que los jaquetones, las orcas y los elefantes marinos se están recuperando todavía de un siglo de persecución humana. «La hipótesis es que [ese tipo de interacciones] han existido siempre; sencillamente, todos esos animales habían desaparecido del ecosistema hace más de 100 años. No hay razones para creer que las orcas no cazaran focas o tiburones hace 300 o 400 años, antes de que la especie humana iniciara su caza», concluye Lowe.

—Jason G. Goldman

GERARD SOURY, GETTY IMAGES

ESPACIO

La basura espacial se amontona

El fenómeno amenaza a los satélites y a la propia Tierra

Aunque el espacio es inmenso, las inmediaciones de nuestro planeta se hallan repletas de una cantidad cada vez mayor de basura (*puntos*). Para derribar un satélite bastaría con alcanzarlo con un trozo de chatarra de apenas 10 centímetros de diámetro, mientras que una esquirla de menos de un centímetro podría bastar para inutilizar una nave espacial. Y cuantos más objetos haya (operativos, inactivos o fragmentados), más reentradas en la atmósfera se producirán (*franja rosa*). El problema de las colisiones se ha agravado tanto que, en 2016, la Agencia Espacial Europea, que se encarga de rastrear los objetos, anunció que podría capturar satélites abandonados en órbitas bajas a partir de 2023. La basura espacial se acumula con rapidez, pues cada vez hay más países y compañías que lanzan aparatos al espacio. En febrero de 2017, un solo cohete de la India puso en una órbita 101 *cubesats*, minisatélites del tamaño de una caja de zapatos.

—*Mark Fischetti*

Satélites y chatarra alrededor de la Tierra

Cada punto representa un objeto de más de 10 centímetros

Año	Objetos totales rastreados
1957	
	13
1959	
	80
1961	
	630
1963	
	1,180
1965	
	2,901
1967	
	3,195
1969	
	4,040
1971	
	4,477
1973	
	4,943
1975	
	6,293
1977	
	6,811
1979	
	6,850
1981	
	7,757
1983	
	8,246
1985	
	9,682
1987	
	10,281
1989	
	9,659
1991	
	10,152
1993	
	10,497
1995	
	11,434
1997	
	11,552
1999	
	11,855
2001	
	11,993
2003	
	11,739
2005	
	12,615
2007	
	16,505
2009	
	18,579
2011	
	18,412
2013	
	18,354
2015	
	18,494
2017	
	19,738

Objetos totales rastreados
Nuevos objetos por año
Caídas por año

La URSS envía el primer satélite al espacio. Lanzamientos globales de cohetes desde entonces: 5400

El Reino Unido se une a la URSS y EE.UU. como propietario de satélites. Satélites lanzados en todo el mundo desde entonces: 8650

Con el tiempo, algunos aparatos caen de nuevo a la Tierra. Satélites aún en el espacio: 4700; aún en funcionamiento: 1800

China hizo estallar deliberadamente un satélite en una prueba de misiles, lo que generó 3400 fragmentos rastreables. Otras averías, explosiones o colisiones que producen chatarra espacial: más de 500

Chocan un satélite militar ruso y otro de comunicaciones estadounidense. Fragmentos eyectados: más de 2000

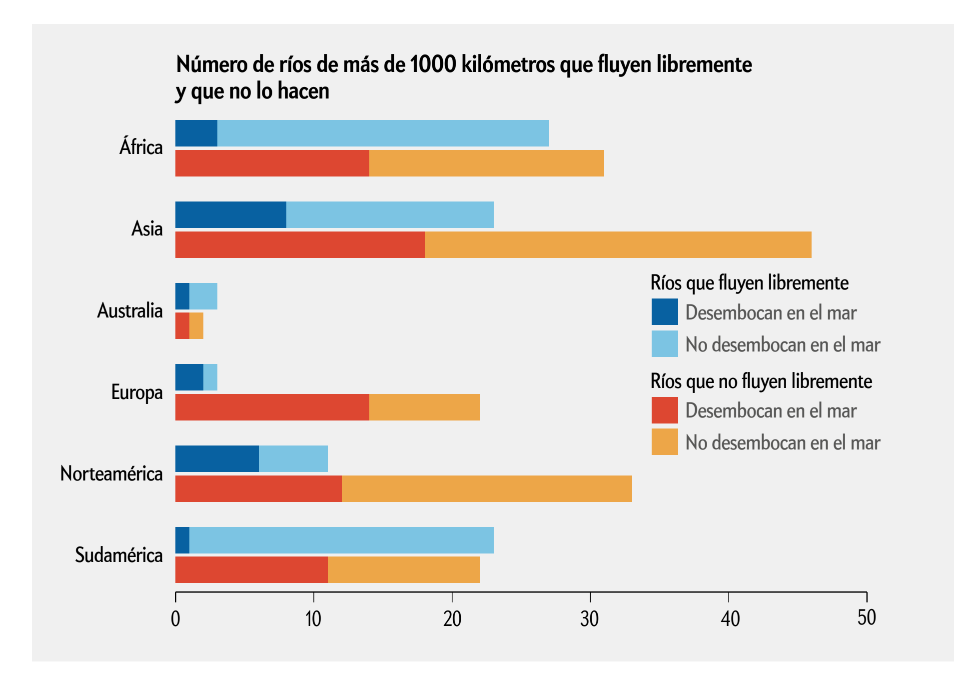
Los restos pequeños en órbitas altas resultan imposibles de rastrear. Total de objetos en órbita según los modelos de la ESA:
29.000 mayores de 10 cm
750.000 entre 1 y 10 cm
166 millones entre 1 mm y 1 cm

FUENTES: «SPACE DEBRIS BY THE NUMBERS», AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, 2018; «SPACE DEBRIS: THE ESA APPROACH», ESA BR-336, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, 2017

HIDROLOGÍA

Ríos apresados

Las infraestructuras humanas constriñen buena parte de los ríos más largos del mundo



Los ríos son arterias terrestres que transportan nutrientes, sedimentos y agua dulce al tiempo que mantienen sanos los ecosistemas. Su influencia se extiende en varias dimensiones: no solo a lo largo de su curso, sino también verticalmente (a los acuíferos subterráneos) y, cada cierto tiempo, lateralmente (a los terrenos inundables cercanos).

También nos brindan servicios vitales al regar las tierras de cultivo, sustentar pesquerías y actuar como corredores de transporte. Sin embargo, nuestros esfuerzos por facilitar el paso de barcos, proteger a las comunidades de las inundaciones y extraer agua para consumo y regadío han restringido y dividido cada vez más las vías fluviales. «Tratamos de dominar los ríos al máximo», explica Günther Grill, hidrólogo de la Universidad McGill.

En una nueva investigación publicada en mayo en *Nature*, Grill y sus colaboradores analizaron los obstáculos existentes en 12 millones de kilómetros de ríos de todo el mundo. Su equipo desarrolló un índice que evaluaba seis aspectos relacionados con la conectividad: desde la fragmentación física (debida a presas, por ejemplo) hasta la regulación del caudal (mediante presas o diques) y el consumo de agua. Consideraron que los ríos cuyos índices alcanzaban un cierto valor umbral fluían libremente.

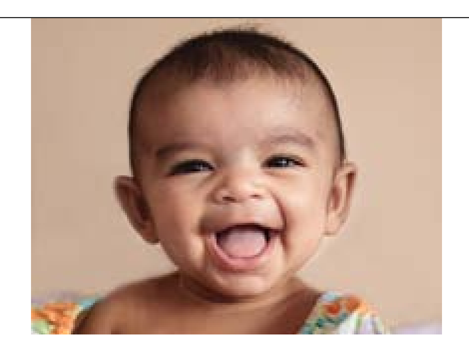
El trabajo ha revelado que solo el 37 por ciento de los ríos de más de mil kilómetros de longitud (por lo general, los más importantes para la actividad humana) fluyen sin impedimentos a lo largo de todo su curso (*gráfico*). La mayoría de estos grandes ríos libres de obstáculos se encuentran en áreas donde la presencia humana es mínima, como las cuencas del Amazonas, el Congo o el Ártico. En cuanto a los ríos de menos de cien kilómetros, la mayoría parece fluir libremente, si bien existen menos datos sobre ellos y es posible que se hayan pasado por alto algunas barreras. Si de los ríos más largos nos fijamos en aquellos que desembocan en el mar, solo el 23 por ciento fluye sin interrupciones. En el resto, las construcciones humanas están privando a estuarios y deltas de nutrientes esenciales. Las presas, al controlar el caudal de los ríos y retener los sedimentos, son las principales culpables. En el mundo existen unos 2,8 millones de ellas.

El nuevo trabajo podría ayudar a entender mejor la manera en que las futuras presas, diques y otros proyectos similares aca-

PSICOLOGÍA DEL DESARROLLO

Risa amistosa

Los bebés de cinco meses distinguen las carcajadas compartidas por amigos y por extraños



La mayoría de la gente puede echar unas risas con un desconocido. Pero existen diferencias tan sutiles como perceptibles en las carcajadas que mantenemos con un allegado.

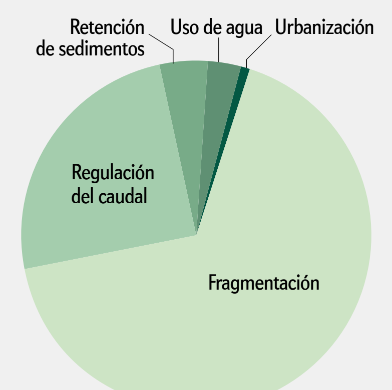
Greg Bryant, experto en cognición de la Universidad de California en Los Angeles, y sus colaboradores habían descubierto que los adultos de 24 sociedades de distintos lugares del mundo diferencian las risas compartidas entre amigos de las entabladas con extraños. El hallazgo plantea la posibilidad de que tal facultad sea un recurso universal para nuestras relaciones sociales. Así que se preguntaron: ¿distinguen los bebés esa risa?

Bryant y su colaboradora Athena Vouloumanos, psicóloga del desarrollo en la Universidad de Nueva York, reprodujeron grabaciones de carcajadas entre pares de amigos o desconocidos ante 24 bebés de cinco meses de la ciudad de Nueva York. Los oyentes prestaron atención durante más tiempo a las risas compartidas entre colegas, lo cual indica que podrían diferenciarlas, según un estudio publicado en marzo en *Scientific Reports*.

A continuación, los investigadores les mostraron unos vídeos cortos de dos personas actuando como amigos o extraños junto con las grabaciones de audio. Los bebés fijaron su mirada durante más tiempo en las imágenes que no concordaban con el audio, como cuando veían un encuentro de amigos pero escuchaban la risa entre desconocidos.

«Las risas compartidas transmiten algo que da información al bebé de tan corta edad sobre los lazos sociales que mantienen los individuos», asegura Bryant. Está por ver qué componentes exactos de la risa reconocen, pero trabajos precedentes de su equipo ofrecen alguna pista. Las risas entre amigos suelen incluir fluctuaciones más acusadas del tono y de la intensidad, por ejemplo.

FUENTE: «MAPPING THE WORLD'S FREE-FLOWING RIVERS», POR G. GRILL ET AL., EN *NATURE*, VOL. 569, 9 DE MAYO DE 2019; MELISSA THOMAS BAUM, BUCKYBALL DESIGN (*gráficos*); AARTI KALYANI, GETTY IMAGES (*bebé*)



LAS CAUSAS PRINCIPALES de la interrupción de los ríos (pérdida de conectividad) son la fragmentación causada por infraestructuras como las presas; los cambios en el caudal y el comportamiento estacional que estas provocan; y la retención de sedimentos en tales obstáculos.

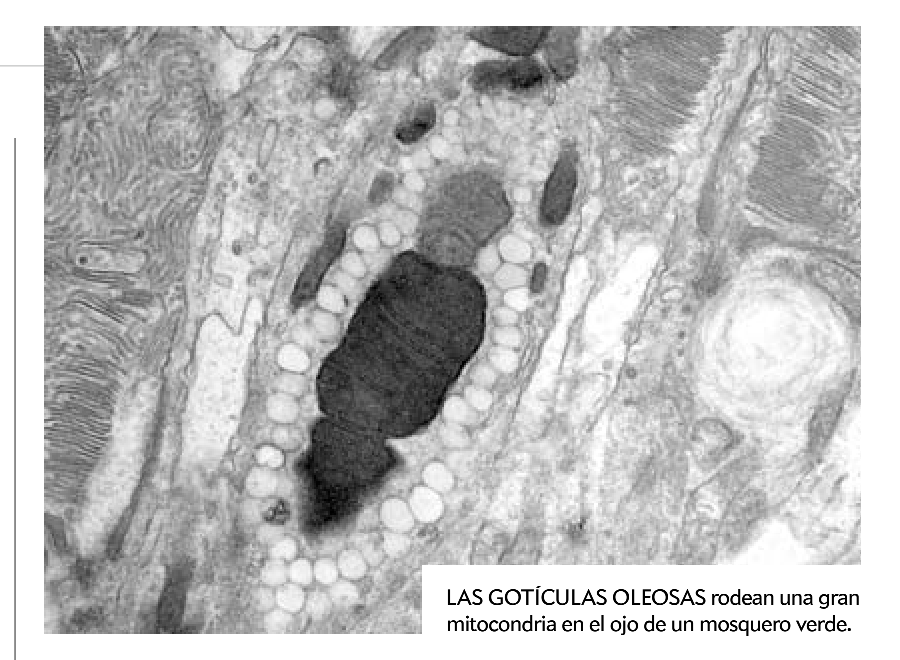
barán afectando a la conectividad de los ríos, así como a determinar en qué lugares la eliminación de estas infraestructuras permitiría recuperar el flujo natural del agua. Y tal vez sirva para replantear la manera de encarar el problema a medida que cambia el clima, apunta Anne Jefferson, hidróloga de la Universidad Estatal de Kent que no participó en el trabajo. Las infraestructuras existentes, explica, «básicamente se construyeron para un clima que ya no es el actual y del que cada vez estamos más lejos».

—Andrea Thompson

Tales características también diferencian las risas espontáneas de las fingidas. Muchos creen que la risa genuina probablemente evolucionó a partir de vocalizaciones lúdicas, que también emiten primates no humanos y roedores, entre otros mamíferos. La risa forzada probablemente surgió después en los humanos, junto con la facultad de articular una amplia gama de sonidos del habla. Los investigadores plantean que esa sensibilidad humana a la risa espontánea sería fruto de su larga historia evolutiva.

«Es fenomenal ver cómo los bebés tan pequeños son capaces de reconocer risas distintas», confiesa Adrienne Wood, psicóloga de la Universidad de Virginia, que no ha participado en el estudio. «Para ellos, casi todo lo que sucede a lo largo del día constituye una interacción social, por lo que tiene sentido que se compenetren de ese modo con su entorno social.»

—Diana Kwon



LAS GOTÍCULAS OLEOSAS rodean una gran mitocondria en el ojo de un mosquero verde.

DE «A NOVEL CELLULAR STRUCTURE IN THE PHOTORECEPTORS OF INSECTIVOROUS BIRDS», POR LUKE P. TYRRELL Y COLS. BORRADOR DEL ARTÍCULO COLGADO EN *BIORXIV* EL 15 DE FEBRERO DE 2019

EVOLUCIÓN

El secreto del pájaro mosquero

Ciertas estructuras de la retina le ayudarían a seguir el movimiento de las presas

En lugar de perseguir a las presas en vuelo como otros muchos pájaros, el mosquero verdoso (*Empidonax virescens*) prefiere acechar a los insectos posado en una percha. Recientemente, en el ojo de este pájaro se ha descubierto una curiosa estructura que le ayudaría a seguir los veloces movimientos de su alimento desde su posición estática.

El ecólogo de la visión Luke P. Tyrrell, de la Universidad Estatal de Nueva York en Plattsburgh, y sus colaboradores han descubierto que los fotorreceptores (células sensibles a la luz) situados en el centro de la retina del mosquero albergan mitocondrias enormes. Estos orgánulos responsables de producir la energía que precisa la célula aparecen rodeados por cientos de gotículas oleosas que forman una mancha alargada. Ya se habían observado mitocondrias voluminosas en el ojo del pez cebra y de las tupayas, y muchos receptores de aves contienen gotitas de grasa que modifican la luz, pero el aparato óptico del mosquero resulta inédito para los biólogos.

«Ha causado bastante asombro», en palabras de Joseph Corbo, científico de la visión de la Universidad de Washington en San Luis, ajeno al estudio. «Ha sido algo inesperado. No hay nada parecido en ninguna otra especie, ya sea de ave o de cualquier otro animal, que tenga esa peculiar forma de nave espacial.»

Los fotorreceptores de otros pájaros contienen gotículas oleosas, pero suele ser una sola de gran tamaño, matiza Tyrrell. En el caso del mosquero, «son cientos o miles, diminutas y hacinadas en torno a las mitocondrias, lo que también es sumamente inusual. Me recordaban a una bolsa repleta de cacahuetes». Tyrrell publicó el manuscrito del artículo en el repositorio *bioRxiv* en febrero y desde entonces lo ha presentado a varias revistas sometidas a revisión por pares.

Las gotículas filtran las longitudes de onda cortas de la luz y solo dejan pasar las largas (naranja y roja). Se cree que estas últimas estimulan a ciertas enzimas mitocondriales para que produzcan más energía destinada a la célula retiniana, tal y como ya se ha demostrado en los ratones, aclara Tyrrell. «Esa energía ayudaría a la neurona a entrar en acción más veces por segundo. Es como la velocidad de los fotogramas de una cámara», explica. Afirma que eso permitiría al mosquero no perder de vista a sus ágiles presas.

Corbo pide prudencia a la hora de especular sobre la función energética de la estructura, y apunta que si esa adaptación especializada existe por tal razón, probablemente será compartida por más aves. No está seguro de qué otro cometido podría cumplir, aparte del de filtrar y canalizar las longitudes de onda lumínicas con algún otro fin. «Creo que puede tratarse [tan solo] de un tipo de gotícula oleosa modificada, más refinada», opina. En este momento, Tyrrell investiga si otros pájaros muy afines al mosquero verde presentan estructuras similares.

—Jim Daley

TECNOLOGÍA SANITARIA

Un respirador que podría salvar vidas

Desarrollan un aparato que permite automatizar el ambú

Cuando alguien tiene graves dificultades para respirar, el personal sanitario suele colocarle una máscara provista de un balón que debe comprimirse con las manos para insuflar aire en los pulmones hasta que se le pueda conectar a un ventilador mecánico.

En los países desarrollados, el balón de reanimación, o ambú, suele ser una solución provisional, aplicada poco tiempo. Pero en los lugares donde escasea el personal y carecen de ventiladores mecánicos, «la vida del enfermo queda literalmente en las manos de los familiares», que deben accionar el ambú durante períodos muy dilatados, explica Rohith Malya, director de Urgencias del Hospital Cristiano del Río Kwai, en Tailandia. El centro presta asistencia a numerosos refugiados de la crisis de los rohinyás en Birmania, situada al otro lado de la frontera cercana. Este médico ve fallecer a enfermos aquejados de neumonía y otras dolencias curables porque los familiares están demasiado agotados como para seguir comprimiendo el balón. Por eso, ahora colabora con un equipo de diseño integrado por estudiantes de grado de la Universidad Rice para crear un aparato que lo haga automáticamente.

El equipo espera que el ingenio, con un coste de 117 dólares, pueda ser de gran utilidad en catástrofes y durante el traslado urgente del enfermo hasta que pueda acceder a un ventilador, o incluso como sustituto de este. El AutoBVM (siglas en inglés de ambú automático), como se lo denomina, se conecta a una toma de pared convencional y consta de dos «compresores» triangulares de plástico montados sobre una carcasa y accionados por un motor. La fabricación de una versión con batería es prioritaria, aclara Carolina de Santiago, bioingeniera del equipo de Rice.



AMBÚ automatizado.

Un prototipo, con la configuración habitual para un paciente adulto, funcionó hasta once horas en las pruebas de laboratorio antes de sobrecalentarse, explica De Santiago. Hasta ahora, el AutoBVM no se ha probado en enfermos. Malya planea trabajar con un equipo de graduados para crear otra versión equipada con otro motor que mejore el tiempo de funcionamiento. También espera mejorar la estanqueidad y el sistema de filtración del aparato a fin de adecuarlo a las situaciones de desastre y a los entornos polvorientos y tórridos. Pretende ponerlo a prueba en pacientes del Hospital Cristiano del Río Kwai el año próximo.

Son muchas las personas que no tienen acceso a los ventiladores mecánicos en el mundo, pues llegan a tener un coste prohibitivo de 100.000 dólares, afirma Abdullah Saleh, director del Departamento de Cirugía Global de la Universidad de Alberta, ajeno al estudio. El ambú está «disponible hasta en las zonas remotas y con escasos recursos», destaca. «Automatizar el insuflador resolvería un problema realmente serio.»

—Rachel Crowell

NEUROTECNOLOGÍA

Resonancias cerebrales más sensibles

Una captación de imágenes más ágil mejora la técnica

La invención de la resonancia magnética funcional (RMf), hace casi 30 años, supuso una revolución en el campo de las neurociencias al permitir visibilizar la actividad encefálica vinculada con el comportamiento. Esta técnica brinda precisión espacial, pero su talón de Aquiles radica en la velocidad; la RMf mide las variaciones de la concentración de oxígeno en la sangre con una demora de unos seis segundos, un ritmo muy lento en contraste con la velocidad a la que viajan de las señales eléctricas del encéfalo. Otros métodos, como la electroencefalografía (EEG), son rápidos pero imprecisos y no detectan las señales generadas en las profundidades del órgano.

Ahora los físicos Samuel Patz, de la Escuela de Medicina de Harvard, y Ralph Sinkus, del Colegio King de Londres, y sus colaboradores han adaptado una técnica de imagen existente para mejorar la velocidad de la RMf y la han ensayado en cerebros de ratón. Denominada elastografía por RMf (ERMf), consiste en emitir vibraciones a través de los tejidos y en medir su velocidad por medio de la resonancia magnética. Las vibraciones se propagan más rápido en la materia rígida, produciendo «elastogramas» o mapas de la rigidez de los tejidos, que pueden concordar con la actividad del encéfalo. Según los investigadores, esta es la primera vez que se emplea la ERMf para medir esa actividad.

En un estudio publicado en abril en *Science Advances*, relatan cómo propinaron a ratones pequeñas descargas eléctricas en las patas traseras para inducir señales en el encéfalo, y las aplicaron o retiraron con diversos ritmos. La comparación de los elastogramas tomados con o sin la estimulación les permitió generar imágenes que indicaban en qué zonas variaba la rigidez a consecuencia de la estimulación. Los autores creen que algunas células cerebrales se ablandan cuando las neuronas asociadas a ellas generan los impulsos eléctricos, lo que supondría que los cambios de rigidez coincidirían con la actividad nerviosa. Al modificar la frecuencia de estimulación y apagado, han demostrado que la ERMf es capaz de detectar señales cerebrales al menos cada 100 milisegundos.

El equipo está sometiendo a prueba el método en humanos y están obteniendo datos alentadores. Si todo culmina con éxito, esta técnica supondría un avance importante en la toma de neuroimágenes. «Podría llevar al análisis de la "conectividad efectiva", en la que se intenta averiguar cómo circula la información a través de los circuitos neuronales», explica el neurocientífico Jonathan Roiser, del Colegio Universitario de Londres, que no ha participado en el trabajo.

La neurocirujana Alexandra Golby, colega de Patz, espera que la ERMf sirva para delimitar las zonas críticas del cerebro vetadas en las intervenciones quirúrgicas. En cerca del 30 por ciento de los pacientes con tumores, la masa tumoral bloquea la variación de la oxigenación sanguínea que mide la RMf, explica Patz, «así que [Golby] quería un método que funcionara de otro modo». La técnica podría ayudar a la larga a conocer mejor y diagnosticar trastornos motivados por alteraciones de los circuitos cerebrales, como la esquizofrenia. «Puede revelar muchísima información valiosa para el diagnóstico y la evolución de la enfermedad», asegura Patz.

—Simon Makin

JEFF FITLOW, UNIVERSIDAD RICE



ECOLOGÍA

Luz UV para salvar aves

La iluminación ultravioleta reduce las muertes de pájaros en los tendidos eléctricos

Las actividades humanas están acabando con la fauna a un ritmo sin precedentes, con causas que van desde la contaminación ambiental hasta la construcción. En algunas especies de aves, las colisiones nocturnas con tendidos eléctricos están provocando una disminución sustancial de la población. Ahora, un grupo de científicos ha propuesto un ingenioso método para que las aves detecten más fácilmente los cables sin hacerlos antiestéticos.

Aunque las directrices de la industria y del Servicio de Pesca y Vida Salvaje de EE.UU. recomiendan que las compañías eléctricas marquen sus cables con plástico para aumentar la visibilidad, las aves continúan muriendo. En 2009, las colisiones con cables marcados acabaron con 300 grullas canadienses en tan solo un mes en el Santuario de Rowe, en Nebraska, donde estas aves se detienen durante su migración anual de primavera. «Necesitamos métodos innovadores para proteger no solo a las grandes aves, para las que los tendidos eléctricos suponen un claro peligro, sino también a millones de aves migratorias de menor tamaño», defiende Anne Lacy, de la Fundación Internacional de la Grulla.

La mitad de las especies de aves pueden ver luz ultravioleta (UV). Así que a James Dwyer, biólogo de la consultora EDM International, se le ocurrió iluminar las líneas eléctricas con luz UV cercana al visible. El equipo de ingenieros de EDM y el Distrito de Energía Pública de Dawson desarrollaron los sistemas de iluminación y los instalaron en una torre de un tendido eléctrico del Santuario de Rowe. Durante un período de 38 noches, los choques de las grullas disminuyeron en un 98 por ciento cuando las luces estaban encendidas, según refirieron los investigadores en un estudio publicado en línea el pasado mayo en *Ornithological Applications*.

Richard Loughery, director de actividades ambientales del Instituto Eléctrico Edison, que no participó en el proyecto, afirma que el nuevo sistema constituye una herramienta útil en aquellos puntos críticos donde anidan y se alimentan las especies de aves en peligro de extinción.

Los investigadores no observaron ningún efecto negativo en otras especies: los insectos no se lanzaron en masa hacia las luces, ni tampoco lo hicieron los murciélagos ni los añaperos en busca de alimento. Y Dwyer ve poco probable que las aves confundan esta iluminación UV cercana a la superficie con señales naturales, como la luz de las estrellas.

«No quiero que las compañías eléctricas pongan cables donde les apetezca solo porque tenemos una nueva herramienta», advierte el biólogo Robert Harms, del Servicio de Pesca y Vida Salvaje de EE.UU., que no participó en el trabajo. Pero para los tendidos existentes, concluye, el nuevo sistema parece aportar enormes ventajas.

—*Rachel Berkowitz*

RANDY GREEN, ALAMY (*pájaros*); CCCB (*cuántica*)

AGENDA

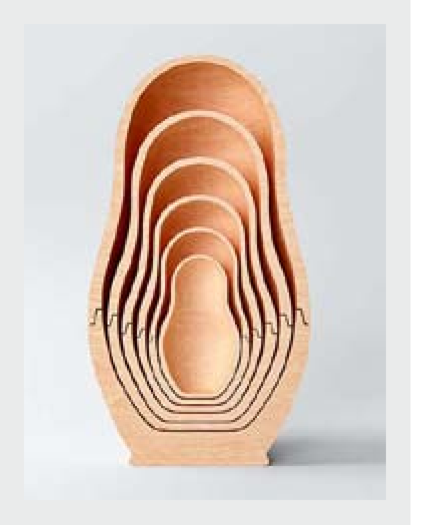
EXPOSICIONES

El mono asesino
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Todo es química
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa
mnactec.cat

Artifex: Ingeniería romana en España
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

Cuántica
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org



Cabezas cortadas: Símbolos de poder
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
www.man.es

Tintín y la Luna: 50 años de la primera misión tripulada
CaixaForum
Sevilla
caixaforum.es/es/sevilla

OTROS

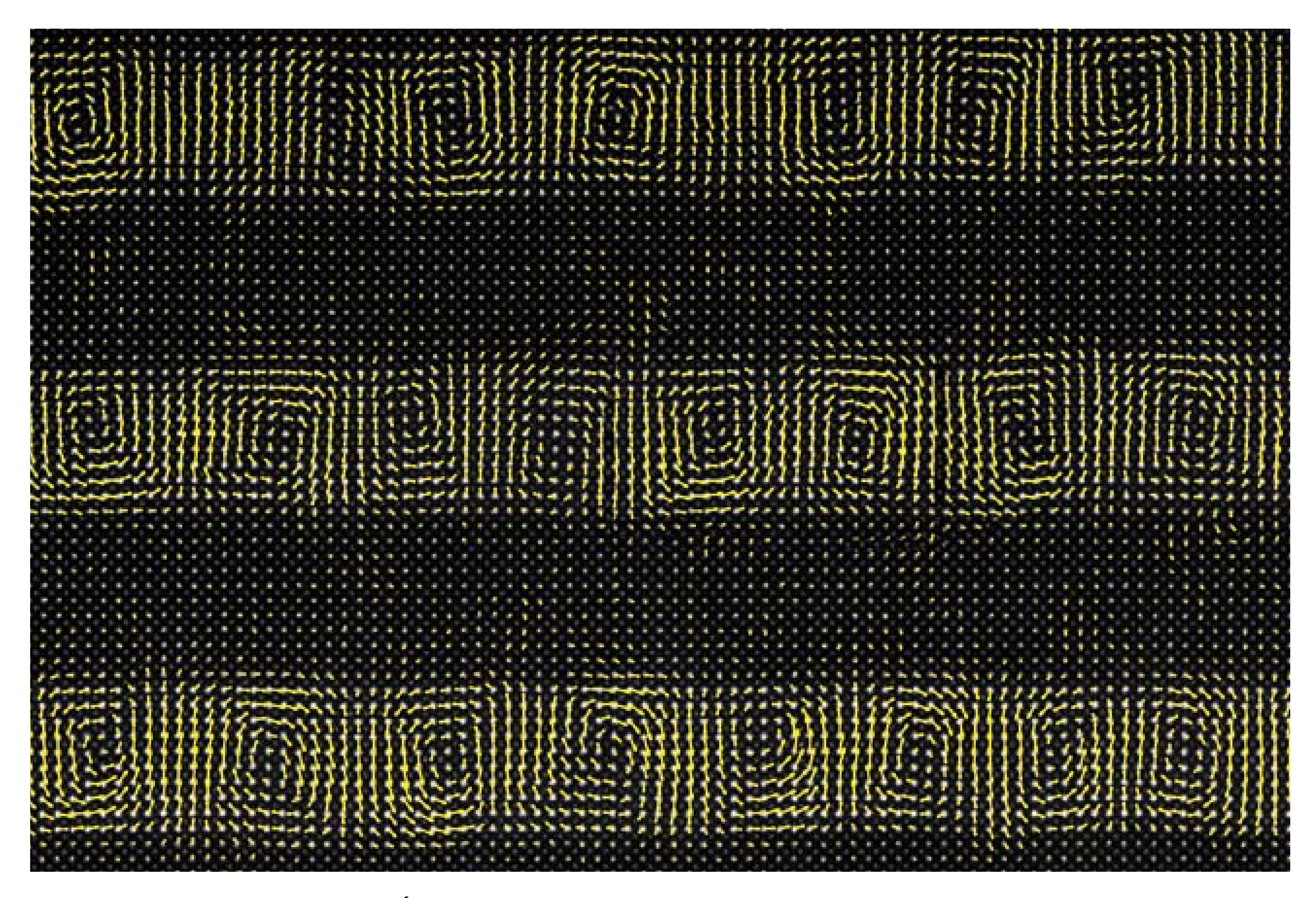
Hasta el 30 de agosto - Concurso
Contemos la ciencia
Concurso de narrativa científica para estudiantes
Convoca: Academia Nacional de Ciencias
Argentina
www.anc-argentina.org.ar

ELECTRÓNICA

Condensadores con capacidad negativa

Un estudio encuentra el origen microscópico de la capacidad negativa, una exótica propiedad electrónica que aparece en ciertos materiales. El hallazgo augura el diseño de nuevos transistores más eficientes

PABLO GARCÍA-FERNÁNDEZ Y JAVIER JUNQUERA



REMOLINOS DE POLARIZACIÓN: Mapa microscópico de la polarización (*flechas amarillas*) en capas de titanato de plomo y titanato de estroncio. La inusual reacción de estos materiales ante un campo externo genera zonas donde la capacidad eléctrica es negativa, un fenómeno considerado imposible hasta hace pocos años.

CORTESÍA DE RAMAMOORTHY RAMESH, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY

Todos los aparatos electrónicos que nos rodean se basan en el uso de transistores: diminutos dispositivos de mecanismo aparentemente simple. Un transistor puede entenderse como un pequeño interruptor con dos posiciones: «encendido» (permite la circulación de corriente) y «apagado» (no la permite). Una combinación adecuada de ellos permite implementar cualquier operación lógica. Su descubrimiento, efectuado en los años cuarenta del siglo pasado por John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley en los Laboratorios Bell, fue reconocido en 1956 con el premio Nobel de física y supuso el inicio de la revolución tecnológica de la que disfrutamos hoy.

Desde sus comienzos, la industria microelectrónica se ha obsesionado con integrar un número cada vez mayor de transistores en los circuitos. Esta carrera por la miniaturización se resume en la conocida ley de Moore, enunciada en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel, y según la cual el número de transistores en un circuito se duplica aproximadamente cada dos años.

En la actualidad, las dimensiones de estos componentes electrónicos se sitúan entre los 15 y los 50 nanómetros, una escala en la que los efectos cuánticos comienzan a ser relevantes. Como consecuencia, un procesador moderno puede llegar a albergar miles de millones de transistores.

Sin embargo, ese aumento en el número de componentes por circuito tiene

un coste asociado: la disipación de calor. Aunque cada transistor desprende una cantidad minúscula de energía (en torno a 10^{-16} julios en cada activación), cuando sumamos las contribuciones de miles de millones de ellos la cantidad final no resulta nada despreciable. Aliviar esa disipación constituye uno de los principales retos a los que se enfrenta hoy en día la industria microelectrónica.

Este año se ha logrado un paso importante en esa dirección. En un estudio publicado en *Nature*, grupos de la Universidad de California en Berkeley, Cornell, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Luxemburgo y la Universidad de Cantabria hemos abordado el origen de un fenómeno que, a primera vista, parece contradecir las leyes de la termodinámica: la aparición de estados con capacidad eléctrica negativa. Este resultado ofrece una vía actualmente en su infancia desde el punto de vista de la investigación básica para aumentar la eficiencia de los transistores, disminuir el calor que disipan y continuar por la senda de la miniaturización.

Condensadores y transistores

En el corazón de todo transistor encontramos un condensador: un dispositivo formado por dos placas metálicas separadas por un material aislante. Cuando entre las placas se establece una diferencia de potencial, el dispositivo acumula carga eléctrica. En un condensador ordinario, la carga almacenada, Q, aumenta de manera proporcional con el voltaje aplicado, V. La constante de proporcionalidad, $C = Q/V$, recibe el nombre de capacidad.

Cuando aplicamos una diferencia de potencial a un transistor, la acumulación de carga en las placas del condensador hace pasar la corriente a lo largo de la puerta lógica y la activa. Además, cuanto mayor sea la capacidad del condensador, menor será el voltaje requerido y, por tanto, más eficiente será el dispositivo y menor resultará la cantidad de calor que disipe al entorno.

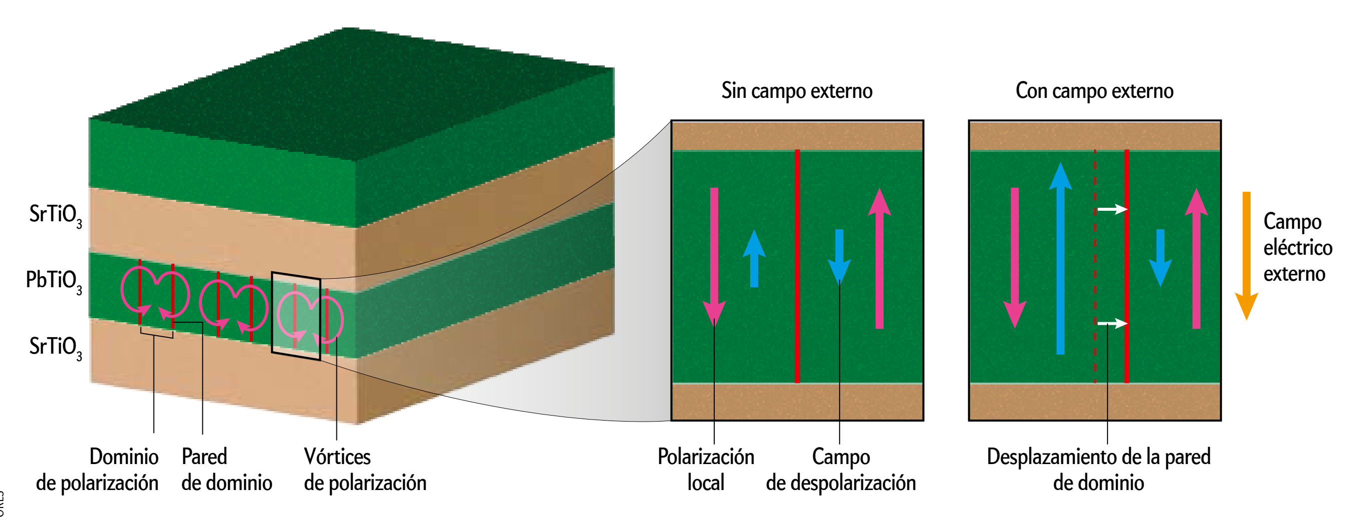
En términos de sus características de diseño, la capacidad de un condensador es directamente proporcional a la llamada «constante dieléctrica» del aislante que separa las placas: una propiedad del material que establece cómo reacciona a los campos eléctricos. La capacidad es también proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a la distancia que las separa.

La miniaturización de los transistores conlleva una reducción del área y, con ello, de la capacidad del condensador. Hasta ahora, para mantener una capacidad elevada se ha ido reduciendo de manera simultánea la separación entre las placas. Sin embargo, esta estrategia se ha topado ya con los límites que impone la mecánica cuántica: los transistores actuales son tan diminutos que, en caso de juntar aún más las placas, entre ellas comenzarían a aparecer corrientes por efecto túnel, lo que imposibilitaría el correcto funcionamiento del dispositivo.

¿Capacidades negativas?

Sin embargo, existe una vía alternativa para aumentar la capacidad de un condensador. Cuando conectamos dos de estos dispositivos en serie, la inversa de la capacidad total es igual a la suma de las inversas de cada una de las capacidades individuales. Esta relación implica que la capacidad total será siempre menor que la de cada uno de los dispositivos por separado. No obstante, esto no ocurriría si la capacidad de uno de los condensadores fuese negativa: en tal caso, la capacidad total podría seguir siendo positiva, pero mayor que la de cualquiera de los condensadores individuales.

Pero ¿qué quiere decir que la capacidad de un condensador sea negativa? La energía almacenada en estos dispositivos aumenta con la capacidad y con la carga acumulada. Si existiesen sistemas con capacidad negativa, eso significaría que, cuanto más carga acumulara el condensador, menor sería su energía, por lo que seguiría cargándose sin fin. Por supuesto, algo así no puede ocurrir en un sistema estable. Este argumento parece definiti-



ORIGEN DE UNA PROPIEDAD EXÓTICA: Cuando el dieléctrico de un condensador ordinario se sustituye por capas de titanato de plomo (un material ferroeléctrico, *verde*) y titanato de estroncio (*marrón*), el sistema se comporta como varios condensadores conectados en serie. Sin embargo, aparece un comportamiento peculiar: la polarización espontánea del $PbTiO_3$ (*magenta*) se rompe en dominios que se cierran formando vórtices, y en la interfaz entre ambos materiales se acumulan cargas eléctricas (*no mostradas*) que generan un campo de despolarización (opuesto a la polarización local, *azul*). Un trabajo reciente ha demostrado que, en presencia de un campo externo (*naranja*), el campo de despolarización crece en la cercanía de las paredes de dominio y es mayor en magnitud que el campo externo. Así pues, el campo total (suma del externo y del de despolarización) apunta en sentido contrario al aplicado: un efecto que equivale a una constante dieléctrica negativa y, por tanto, a una capacidad eléctrica también negativa.

vo e hizo que durante muchos años no se considerase en serio la existencia de estados de capacidad negativa.

La visión del problema cambió de forma radical después de un trabajo publicado en 2008 por Sayeef Salahuddin y Supriyo Datta, por entonces ambos en la Universidad Purdue. En cierto tipo de condensadores que contenían materiales ferroeléctricos, los investigadores observaron una amplificación del voltaje cuando se aplicaba un potencial alterno (uno cuyo signo cambia de manera periódica con el tiempo). El resultado se atribuyó a la existencia de una capacidad negativa que aparecía cuando cambiaba la polarización del sistema. Ello no violaba los principios de la termodinámica ya que, en tal caso, el sistema no se encontraba en el equilibrio.

Aquel resultado abrió la puerta a recrear el efecto en otras condiciones. Sin embargo, para poder aplicarlo a dispositivos reales, era necesario encontrar sistemas que mostrasen capacidad negativa de forma estable.

Un material ferroeléctrico presenta una polarización espontánea incluso en ausencia de un campo eléctrico aplicado. Además, dicha polarización puede cambiar bajo la acción de un campo externo. Un material ferroeléctrico típico es el titanato de plomo ($PbTiO_3$), un óxido con estructura de perovskita. Muy parecido estructuralmente es el titanato de estroncio ($SrTiO_3$), aunque este último no tiende a polarizarse de forma espontánea.

Si se pudiera preparar un «emparedado» de dimensiones atómicas de $PbTiO_3$ entre láminas de $SrTiO_3$, entonces el primero vería penalizada su tendencia a polarizarse debido al tributo energético que tiene que pagar al $SrTiO_3$. En concreto, el desfase entre las polarizaciones de ambos materiales hace que se acumulen cargas en la interfaz que los separa, las cuales crean un campo eléctrico que intenta anular la polarización del material ferroeléctrico. La manera que encuentra el $PbTiO_3$ para minimizar la energía es romperse en «dominios» de tal manera que, aunque no muestra una polarización global, localmente sí está polarizado. En concreto, cerca de las paredes de dominio (las fronteras de los dominios ferroeléctricos), la polarización forma vórtices, estructuras similares a remolinos.

En 2016, Pavlo Zubko, del Colegio Imperial de Londres, y sus colaboradores mostraron que un condensador entre cuyas placas se insertaban láminas de $PbTiO_3$ y $SrTiO_3$ mostraba una capacidad superior a la asociada a cada uno de los dos constituyentes por separado. Por tanto, algo en el interior tenía que estar actuando localmente como un condensador con capacidad negativa.

Pero ¿en qué zona concreta del condensador se localizaba la capacidad negativa? La respuesta a esta pregunta es clave, ya que conocer el origen atómico del fenómeno permitiría aprovecharlo en el diseño de nuevos dispositivos y, de esta manera, maximizar su influencia.

Origen microscópico

Eso es justamente lo que hemos conseguido en nuestro trabajo: «sacar una fotografía» de la zona del material donde se origina la capacidad negativa. Para ello fue necesario obtener una imagen simultánea de la polarización y del campo eléctrico en el interior de la muestra. Un verdadero reto que exigió mejorar todas las técnicas existentes hasta el momento.

Para cartografiar la polarización fue necesario desarrollar en Berkeley nuevos microscopios electrónicos de transmisión con resoluciones sin precedentes, a fin de poder detectar las posiciones atómicas, incluidos los siempre escurridizos y ligeros átomos de oxígeno. Por su parte, la medición del campo eléctrico solo fue posible con el diseño de un nuevo microscopio electrónico de transmisión y barrido en Cornell, en el que se focaliza un chorro de electrones sobre la muestra y se observa cuál es el cambio en su momento angular a la salida. Y el estudio teórico, a cargo de los grupos de Luxemburgo y Cantabria, no fue menos exigente, pues exigió desarrollar nuevas técnicas de simulación capaces de calcular las propiedades estructurales y los campos eléctricos en sistemas con miles de átomos, a temperatura finita y bajo la acción de potenciales externos.

Todos estos esfuerzos nos permitieron determinar que los responsables de la existencia de una capacidad negativa eran los vórtices de polarización en las paredes de dominio. La razón se debe a que dichas regiones no reaccionan como un dieléctrico normal. Al aplicar un campo externo, los dominios ferroeléctricos pueden extenderse o contraerse. Cuando uno de ellos se extiende, el campo de despolarización (opuesto al aplicado) crece en la pared de dominio y es mayor en magnitud que el campo externo. Es decir, el campo total (suma del externo y del de despolarización) apunta en sentido contrario al aplicado. Esta es la huella de una constante dieléctrica negativa y, por tanto, de una capacidad también negativa.

Hacia los transistores del futuro

Una vez identificadas las paredes de dominio como el lugar donde se origina la capacidad negativa, podemos considerar varias líneas de investigación prometedoras. Una de ellas consistiría en aumentar el área de las paredes de dominio a fin de maximizar las zonas responsables de tan exótico comportamiento. En este sentido, un trabajo publicado en abril y en el que también ha participado nuestro grupo ha identificado en estos mismos materiales ciertas estructuras topológicas, conocidas como «skyrmiones», las cuales se perfilan como candidatas ideales para nuevos estudios.

Por otro lado, también cabría considerar materiales ferroeléctricos más compatibles con la tecnología basada en el silicio. Aquí las nuevas fases ferroeléctricas detectadas en el dióxido de hafnio (HfO_2) ofrecen una línea de gran interés. Sea como fuere, no cabe duda de que el hallazgo de una propiedad tan exótica como la capacidad negativa puede considerarse la llama con la que mantener vivo el espíritu olímpico en la carrera hacia la miniaturización electrónica.

Pablo García-Fernández
y ***Javier Junquera*** *investigan en el Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de la Universidad de Cantabria.*

PARA SABER MÁS

Use of negative capacitance to provide voltage amplification for low power nanoscale devices. Sayeef Salahuddin y Supriyo Datta en *Nano Letters*, vol. 8, págs. 405-410, febrero de 2008.
Negative capacitance in multidomain ferroelectric superlattices. Pavlo Zubko et al. en *Nature*, vol. 534, págs. 524-528, junio de 2016.
Spatially resolved steady-state negative capacitance. Ajay K. Yadav et al. en *Nature*, vol. 565, págs. 468-471, enero de 2019.
Observation of room-temperature polar skyrmions. Sujit Das et al. en *Nature*, vol. 568, págs. 368-372, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Memorias del futuro. Luca Perniola en *IyC*, enero de 2014.
Más allá de la ley de Moore. John Pavlus en *IyC*, julio de 2015.

ENERGÍA

Reinventar el combustible nuclear

Un rediseño de las pastillas de uranio usadas en los reactores nucleares podría mejorar la seguridad y la eficiencia de las centrales

ROD McCULLUM



BARRAS DE COMBUSTIBLE ensambladas en estructuras hexagonales en la central nuclear de Dukovany, en la República Checa.

MARTIN DIVISEK, GETTY IMAGES

Los ingenieros están rediseñando el combustible de uranio que se emplea en casi todos los reactores nucleares del mundo. El objetivo consiste en reducir las probabilidades de que, en caso de accidente, se produzca una explosión de hidrógeno y se emita radiación al entorno, como ocurrió en 2011 en la central japonesa de Fukushima Daiichi. Los nuevos combustibles, que todavía deben perfeccionarse, ya se están probando.

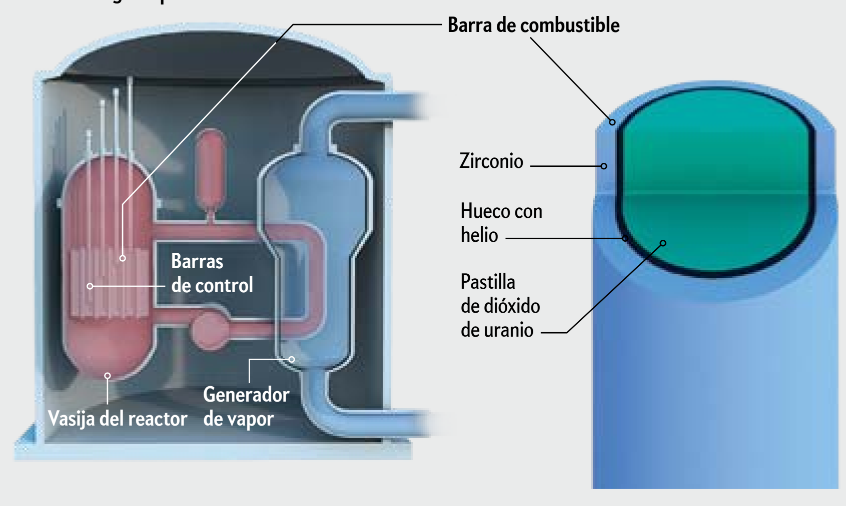
Cuando los átomos de uranio se dividen en el núcleo de un reactor, se liberan neutrones y calor. Los sistemas instalados tanto en el interior como alrededor del núcleo evitan que este se caliente en exceso. Sin embargo, mejorar el combustible para reducir las probabilidades de que el núcleo se funda o se agriete por sobrecalentamiento, así como de que se genere hidrógeno durante un accidente, disminuiría el riesgo de que en tales circunstancias se liberase material radiactivo al exterior. Además, esas mismas mejoras podrían aumentar la eficiencia de las centrales, lo que les permitiría producir electricidad de un modo más competitivo.

En el caso de EE.UU., el combustible de uranio que usan las 98 centrales del país viene en forma de pastillas cilíndricas, cada una del tamaño de la goma de borrar de un lápiz. Esas pastillas se apilan después en el interior de barras alargadas de zirconio, las cuales se sumergen en agua. Durante la fisión, los neutrones liberados en las pastillas atraviesan el zirconio con facilidad y penetran en otras barras, lo que mantiene una reacción en cadena que produce calor. Este transforma el agua en vapor y, por medio de turbinas, produce electricidad.

El zirconio se emplea debido a que los neutrones lo atraviesan con facilidad. En el pasado, la prospección del uranio, su extracción, procesado y enriquecimiento (el incremento de la proporción de núcleos capaces de producir una reacción en cadena) se consideraban procesos complejos y caros, y los neutrones eran demasiado preciados como para perderlos. Sin embargo, tal y como demostró el

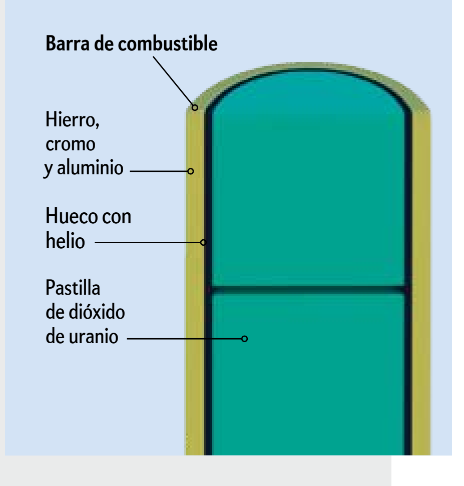
UN NUEVO COMBUSTIBLE

LOS FABRICANTES han comenzado a probar los llamados «combustibles tolerantes a accidentes»: diseños que, en caso de sobrecalentarse, serían mucho menos propensos a generar explosiones y liberar radiación al entorno, como ocurrió en 2011 en Fukushima. Casi todas las centrales utilizan reactores de agua a presión (*abajo, izquierda*) o de agua en ebullición. La fisión se produce en pastillas de combustible apiladas en el interior de barras de zirconio, con un hueco entre medias para permitir la expansión térmica durante el funcionamiento (*abajo, derecha*). A continuación se describen cuatro nuevos diseños.



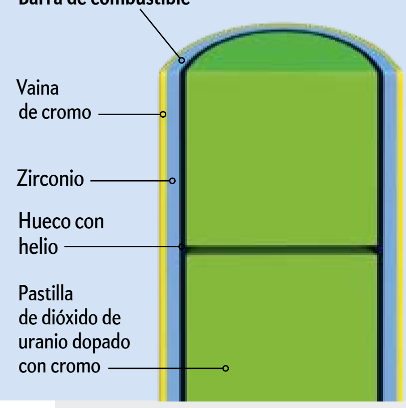
Cambiar las barras

En un reactor nuclear, el calor liberado durante la fisión transforma agua en vapor para producir electricidad. Las barras de combustible tradicionales se componen de zirconio. Este material deja pasar los neutrones liberados durante la fisión, lo que permite que esta se mantenga; sin embargo, en caso de sobrecalentamiento puede reaccionar con el agua y producir hidrógeno, potencialmente explosivo. Una barra fina de hierro, cromo y aluminio no reaccionaría, pero seguiría dejando pasar una cantidad suficiente de neutrones. (Diseño: GE Hitachi Nuclear Energy)



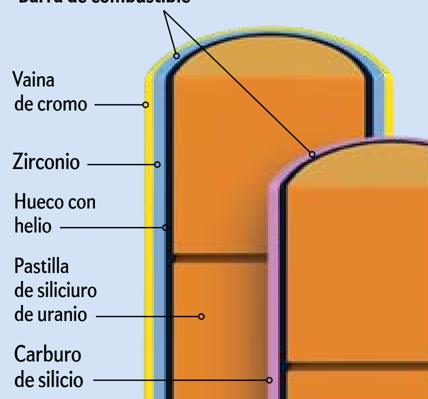
Añadir cromo

Recubrir el zirconio con una capa delgada de cromo ayudaría a evitar que el primero reaccionase con el agua y generase hidrógeno. Además, una envoltura de este tipo puede soportar más calor y durar más tiempo. Por otro lado, añadir cromo a las pastillas de óxido de uranio contribuye a evitar que el combustible se agriete o se deforme cuando se calienta. Ello aumentaría la resistencia del conjunto en caso de accidente y reduciría la probabilidad de que se liberase material radiactivo. (Diseño: Framatome)



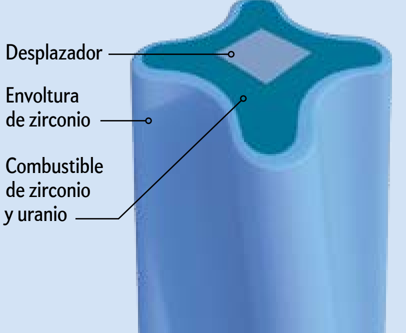
Incorporar silicio

Las pastillas de combustible actuales se componen de dióxido de uranio. Reemplazarlo por siliciuro de uranio permitiría transferir más calor al agua. Como consecuencia, el combustible funcionaría a menor temperatura y se reducirían las probabilidades de producir hidrógeno y liberar radiación en caso de accidente. Además, el zirconio podría recubrirse de cromo (*izquierda*) o reemplazarse por carburo de silicio, que no reacciona con el agua y es menos propenso a agrietarse o deformarse (*derecha*). (Diseño: Westinghouse Electric Company)



Deformar las barras

Este rediseño radical elimina las pastillas. El combustible se compondría de uranio y zirconio y estaría rodeado por una envoltura de este metal. El conjunto se deformaría con el fin de aumentar su superficie y, con ella, la transferencia de calor al agua. Un «desplazador» (*esquema*) distribuiría el calor de forma homogénea. Al optimizar la transferencia térmica, el combustible funcionaría a baja temperatura, lo que reduciría la probabilidad de sobrecalentamiento. El uranio debería enriquecerse al 20 por ciento, en lugar del 5 por ciento de los demás diseños. (Diseño: Lightbridge)



accidente de Fukushima, si el zirconio se sobrecalienta, puede reaccionar con el agua (o el vapor) y generar hidrógeno, potencialmente explosivo.

Hoy, tanto el diseño como la operación de los reactores han avanzado. Sabemos que el uranio es abundante y puede enriquecerse con facilidad, por lo que podemos permitirnos sacrificar algunos neutrones. Como consecuencia, científicos e ingenieros han comenzado a trabajar en diseños alternativos que minimizan la producción de hidrógeno y resisten temperaturas mayores.

A raíz del accidente de Fukushima, los fabricantes, en colaboración con el Departamento de Energía de EE.UU., están avanzando en el desarrollo de cuatro tipos de combustible que han bautizado como «tolerante a accidentes». Todos ellos podrían instalarse en los reactores actuales sin apenas modificar su soporte físico, por lo que sería posible introducirlos a lo largo de la próxima década.

Mejorar el combustible podría suponer el comienzo de un cambio mucho mayor

Tres empresas que ya producen el grueso del combustible del sector (GE Hitachi Nuclear Energy, Framatome y Westinghouse Electric) han comenzado a probar pequeñas cantidades en los reactores actuales. El propósito de estos nuevos diseños es reducir las probabilidades de que el zirconio dé lugar a reacciones problemáticas. Eso puede conseguirse reemplazándolo por otro material, recubriéndolo o modificando la composición de las pastillas de combustible.

Un cuarto método, concebido por la compañía Lightbridge, combina uranio y zirconio en una sola aleación, menos reactiva y moldeada en forma de barrita de regaliz para transmitir mejor el calor. No obstante, para que funcione, el uranio debe enriquecerse en porcentajes superiores a los permitidos en la actualidad, por lo que sería necesario modificar la normativa.

Durante décadas, los propietarios de las instalaciones han tenido dificultades legales para usar nuevos tipos de combustible. Hoy lo intentan de nuevo ante la necesidad de competir con el gas natural, más barato, y unas energías solar y eólica cada vez más extendidas. En EE.UU., una amplia infraestructura de investigación y desarrollo nuclear, representada mayoritariamente por los laboratorios nacionales, colabora con los propietarios de las centrales en los procesos de diseño y fabricación.

La iniciativa se está expandiendo con rapidez por todo el mundo. En julio de 2018, científicos de EE.UU. y la Unión Europea celebraron unas jornadas en el Laboratorio Nacional de Idaho para discutir cómo aunar recursos de investigación en ambos continentes. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) está desarrollando un marco que permitiría probar nuevos combustibles. Si los combustibles tolerantes a accidentes dan buenos resultados, la energía nuclear podría recuperar impulso en Japón, donde continúa el debate sobre qué fracción de su parque de reactores debería volver a ponerse en marcha.

Por supuesto, aún deben superarse importantes obstáculos. Antes de que los nuevos materiales estén listos para su uso comercial, deben efectuarse numerosas pruebas con pequeñas cantidades de combustible y simular los resultados por ordenador. Los escépticos deberán convencerse de que los nuevos materiales funcionarán según lo prometido. Al respecto, ya se están desarrollando técnicas de modelización. Las empleadas por el Consorcio para la Simulación Avanzada de Reactores de Agua Ligera del Departamento de Energía de EE.UU., con sede en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, podrían acelerar de manera considerable la investigación básica, el desarrollo de la ingeniería necesaria y su comercialización.

Si los datos de los ensayos resultan convincentes, la cadena de suministro de combustible (desde la fábrica hasta la plataforma de recarga del reactor) debería reorganizarse y los procesos de las centrales tendrían que adaptarse en consecuencia. Los reguladores habrán de aprobar cada uno de los pasos.

Por último, mejorar el combustible podría suponer el comienzo de un cambio mucho mayor. En la actualidad se están diseñando reactores de alta temperatura refrigerados por gas, los cuales emplearían partículas de uranio revestidas por materiales exóticos. La reacción nuclear quedaría controlada por las propias pastillas, las cuales tendrían forma de bola, y no por las barras de control que suelen insertarse entre las barras de combustible. También se hallan en camino los reactores de sales fundidas, en los que el combustible y el refrigerante pueden combinarse para disponer de mecanismos simples que eviten el sobrecalentamiento.

Los sectores del gas natural, la energía solar y la energía eólica han experimentado cambios considerables en muy pocos años. También la energía nuclear podría estar lista para reinventarse.

Rod McCullum *dirige la sección de desmantelamiento y combustible usado del Instituto de Energía Nuclear estadounidense, con sede en Washington.*



PARA SABER MÁS

Advanced fuel pellet materials and fuel rod design for water cooled reactors. Organismo Internacional de Energía Atómica, octubre de 2010.

Accident tolerant fuel concepts for light water reactors. Organismo Internacional de Energía Atómica, junio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nueva generación de la energía nuclear. James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek en *IyC*, marzo de 2002.

JOSÉ MIGUEL MAYO (*ilustración*)



El auge de los animales

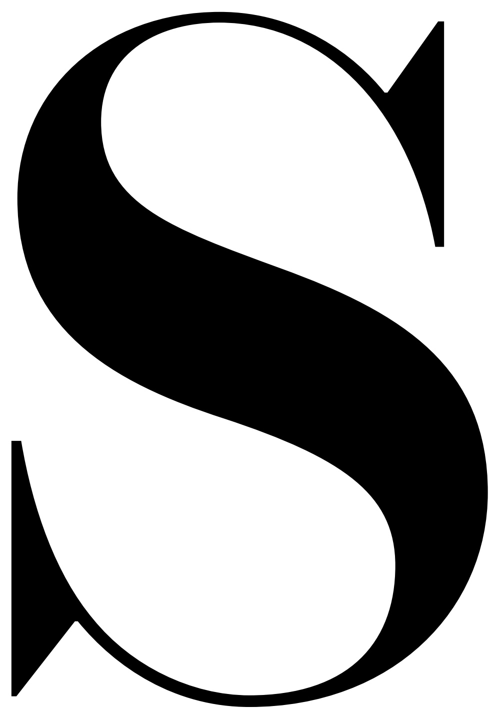
Nuevos hallazgos fósiles y datos recientes sobre las características químicas de los antiguos océanos revelan las profundas raíces de la explosión cámbrica

Rachel A. Wood

Ilustración de Franz Anthony

Rachel A. Wood es paleontóloga y geóloga de la Universidad de Edimburgo. Su investigación se centra en los orígenes y la paleoecología de los arrecifes y en la evolución química del agua marina.





Si nos asomamos a los escarpados acantilados blancos que rodean los grandes ríos de Siberia, nuestros pies estarán señalando un punto crucial de la historia de la vida sobre la Tierra: la frontera geológica de 541 millones de años de antigüedad existente entre los períodos Precámbrico y Cámbrico. Las rocas que se hallan por debajo de esta línea divisoria contienen escasos restos fósiles, impresiones fantasmagóricas de organismos de cuerpo blando y un puñado de formas con caparazones. Pero si partimos cualquiera de las rocas que se hallan justo por encima del límite, veremos que están atestadas de conchas. Solo un poquito más arriba, aparecerán criaturas fósiles que nos resultan familiares, como es el caso de los trilobites. Estos cambios son una prueba de la llamada explosión cámbrica, uno de los sucesos más importantes de toda la evolución, pero del que todavía sabemos muy poco.

Durante décadas, los científicos creyeron que los animales complejos (organismos pluricelulares con tipos diferenciados de tejidos) se originaron durante la explosión cámbrica. Sin duda, durante ese tiempo surgieron una enorme cantidad de formas novedosas, incluidos los antepasados de la mayoría de los principales grupos actuales de animales. Pero descubrimientos recientes en Siberia, Namibia y en otros lugares demuestran que, en realidad, los animales complejos aparecieron millones de años antes de la explosión cámbrica, durante el último capítulo del Precámbrico, conocido como Ediacárico. Entre todos estos hallazgos figuran las criaturas más antiguas conocidas con esqueletos externos e internos compuestos por tejido mineralizado, una innovación evolutiva fundamental presente en muchos animales contemporáneos.

EN SÍNTESIS

Los científicos han pensado durante mucho tiempo que los animales complejos se originaron durante la explosión cámbrica.

Pero un creciente número de pruebas fósiles indican que en realidad aparecieron millones de años antes, durante el período Ediacárico.

Las nuevas técnicas utilizadas para reconstruir la química de los océanos ancestrales han permitido comprender mejor las presiones ambientales que impulsaron esta temprana diversificación evolutiva.

La existencia tan antigua (hace 550 millones de años) de organismos con esqueleto indica que las presiones ecológicas y ambientales que se suponía habían impulsado la explosión cámbrica ya estaban, de hecho, funcionando mucho antes. Para comprender la asombrosa diversificación que se produjo más tarde en el Cámbrico, es fundamental averiguar cómo conformaron esos factores la evolución de los primeros animales complejos durante el Ediacárico.

El registro fósil cámbrico ha sido objeto de un intenso estudio durante más de 150 años. Gracias a ello, existe un acuerdo bastante generalizado sobre cuáles fueron los primeros fósiles cámbricos y cuándo y dónde aparecieron: lo hicieron en distintos continentes y más o menos al mismo tiempo; luego pasaron por la misma sucesión de cambios evolutivos de forma más o menos sincronizada. Pero es solo ahora, gracias a los descubrimientos de fósiles ediacarenses más antiguos, cuando estamos empezando a entender las raíces de la explosión cámbrica.

Resulta alentador ver que también estamos empezando a averiguar por qué se produjo en ese momento, con la ayuda de nuevas técnicas geoquímicas que han revolucionado nuestra comprensión de la química cambiante de los océanos del mundo ediacárico-cámbrico. Solo hace poco se ha podido integrar toda la información que nos aportan los últimos registros fósiles y geoquímicos, la cual mostrará cómo deben de haber operado la biosfera, la geosfera, la hidrosfera y la atmósfera del planeta

BUSCANDO FÓSILES: Se han hallado fósiles clave de animales complejos en rocas ediacarenses de las costas del río Yudoma (*1*), en Siberia, y en el límite del desierto de Namib (*2*), en Namibia.





(conocidas en conjunto como sistema global terrestre) durante este intervalo. Pero ya podemos describir con bastante exactitud cómo el lecho marino se fue poblando con éxito de criaturas cada vez más complejas decenas de millones de años antes de la explosión cámbrica, y se crearon las condiciones ideales para el auge de la vida animal tal como la conocemos.

LOS PRIMEROS ANIMALES

La prueba más antigua de la existencia de los primeros animales no procede de fósiles reconocibles, sino de los restos de compuestos orgánicos conocidos como biomarcadores. Los investigadores han encontrado uno de esos marcadores biológicos, una forma particular de esterano, en rocas bien conservadas de una secuencia sedimentaria conocida como Supergrupo Huqf, en Omán, que tiene al menos 650 millones de años de antigüedad. Algunos expertos creen que estos esteranos son exclusivos de un grupo concreto de esponjas, y que la presencia de esas moléculas en las rocas Huqf demuestra, por lo tanto, que estos animales existieron en esa época tan temprana. Sin embargo, no todos los científicos están de acuerdo en que estos esteranos sean específicos de esas esponjas. De hecho, un estudio publicado en abril sugiere que son característicos de un grupo de amebas unicelulares.

También se ha cuestionado que los fósiles de animales posiblemente más antiguos, procedentes de una secuencia de rocas del sur de China conocida como formación de Lantian y cuya edad puede ser de unos 635 millones de años, correspondan realmente a animales. Algunos investigadores creen que estas diminutas formas con cuerpos blandos están relacionadas con los corales o las medusas porque muestran estructuras similares a tentáculos; pero la conservación de estos fósiles no es lo suficientemente clara como para que se puedan interpretar de forma inequívoca, por lo que muchos siguen sin estar convencidos de que correspondan a algún tipo de animal.

Los restos animales que comúnmente se consideran los más antiguos son unos fósiles de Terranova de hace unos 571 millones de años, poco después de la última superglaciación que cubrió una buena parte del planeta con una gruesa capa de hielo. Estos primeros representantes conocidos de la biota ediacarense eran, en su mayoría, organismos de cuerpos blandos de hasta un metro de altura o anchura. Algunos tenían forma de hojas grandes y pinnadas con tallos verticales que las anclaban al lecho marino; otros se extendían sobre el fondo oceánico, exhibiendo en su cuerpo plano una arquitectura fractal, con unidades ramificadas que mostraban los mismos patrones en todas las escalas. Todos estos planes corporales maximizan la superficie externa del organismo, lo que sugiere que estos animales absorbían los nutrientes directamente del agua circundante.

Esa modesta variedad de fauna prevaleció durante más de 10 millones de años. Pero luego el ritmo de la evolución animal empezó a acelerarse. El registro fósil indica que más tarde, hace unos 560 millones de años, la biota ediacarense se diversificó y dio lugar, entre otras, a formas móviles que vivían en los mares poco profundos. Algunos de estos fósiles conservan marcas de rasguños que hacen pensar que los animales pastaban sobre praderas de algas. Otros puede que se arrastraran sobre ellas, absorbiendo nutrientes a través de la parte inferior del cuerpo. Hacia esa época, aparecieron también las primeras madrigueras, lo que demuestra que los animales habían empezado a mover y alterar los sedimentos presentes en el lecho marino.

Si avanzamos hasta hace 550 millones de años, veremos que los fósiles más antiguos que conservan esqueletos externos e internos aparecen en rocas calizas (compuestas principalmente por carbonato cálcico). Estos fósiles ya son muy variables en tamaño y forma, y aparecen en lugares tan remotos como Siberia, Brasil y Namibia. La presencia, en esa época y alrededor del mundo, de esqueletos en tantos grupos de animales no emparentados es una prueba sólida de la importante fuerza evolutiva que operaba a escala global. No sabemos con certeza en qué consistía esta fuerza. Pero nos hacemos una idea. Fabricar un esqueleto es un proceso energéticamente caro, por lo que, para que un animal hiciese ese esfuerzo, el beneficio debía compensar el coste. Los animales producen un esqueleto por muchas razones, pero la más común, de lejos, es la necesidad de protegerse de los depredadores. Aunque no existen pruebas fósiles sobre la

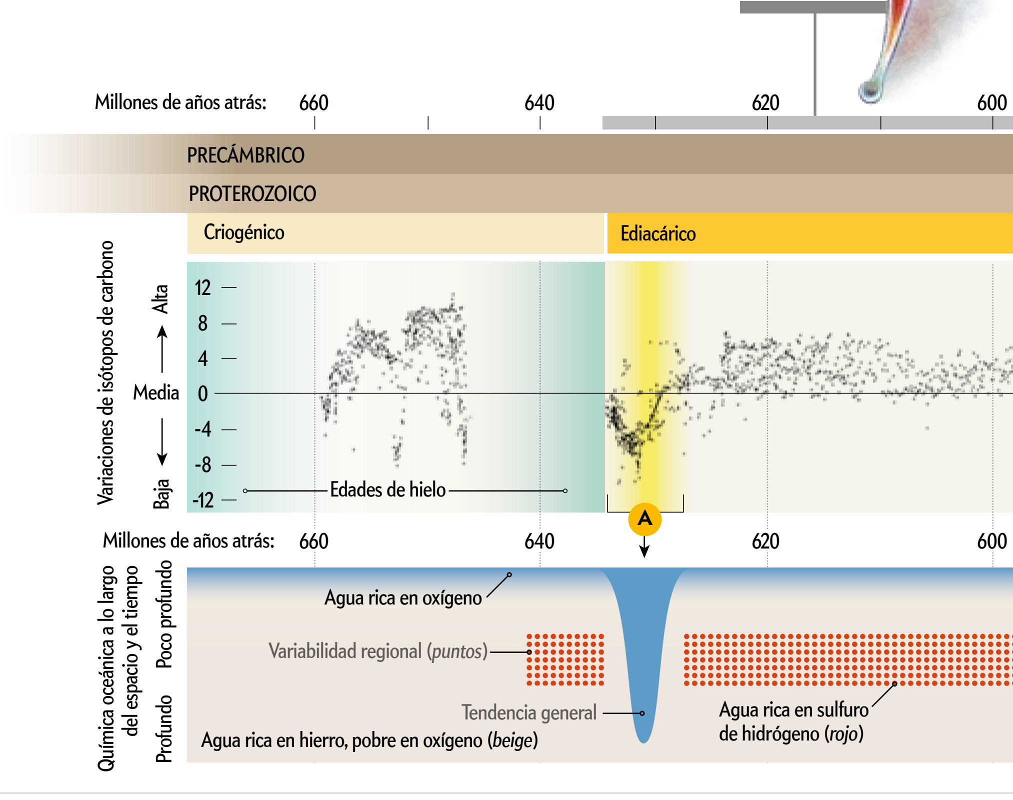
RACHEL A. WOOD

Antes de la explosión cámbrica

Numerosas innovaciones de la evolución animal, cuyo origen se situaba tradicionalmente en el Cámbrico, resulta que, en realidad, son mucho más antiguas, del Ediacárico. Los primeros animales con esqueleto aparecieron durante este período más antiguo. Seguramente, la capacidad de producir tejido mineralizado surgió como un modo de protegerse de los depredadores. La integración de los registros fósiles y geoquímicos que cubren el período de tiempo que va de los 670 millones a los 480 millones de años atrás ofrece pistas sobre los factores ambientales que impulsaron esta temprana actividad evolutiva.

Pruebas geoquímicas

Los animales necesitan oxígeno para vivir. La diversificación evolutiva que tuvo lugar durante el Ediacárico se produjo en una época en la que los niveles del gas en los océanos presentaban enormes fluctuaciones. Los isótopos de carbono de las rocas ediacarenses muestran que el ciclo de carbono era inestable y cambiaba continuamente. Además, los análisis de los compuestos de hierro presentes en estas rocas indican que, durante el Ediacárico, el oxígeno disuelto en los océanos alcanzó probablemente un valor umbral, o una serie de ellos. Ello permitió a los animales diversificarse, al satisfacerse sus crecientes demandas metabólicas a medida que se volvían más activos. Los investigadores creen ahora que los mares se fueron oxigenando progresivamente, no en único episodio lento y gradual, sino en una serie de ellos (A, B, C y D), los cuales parecen coincidir con las variaciones de los isótopos de carbono. Esta tendencia continuó a lo largo de todo el Ediacárico y seguramente durante mucho más tiempo.



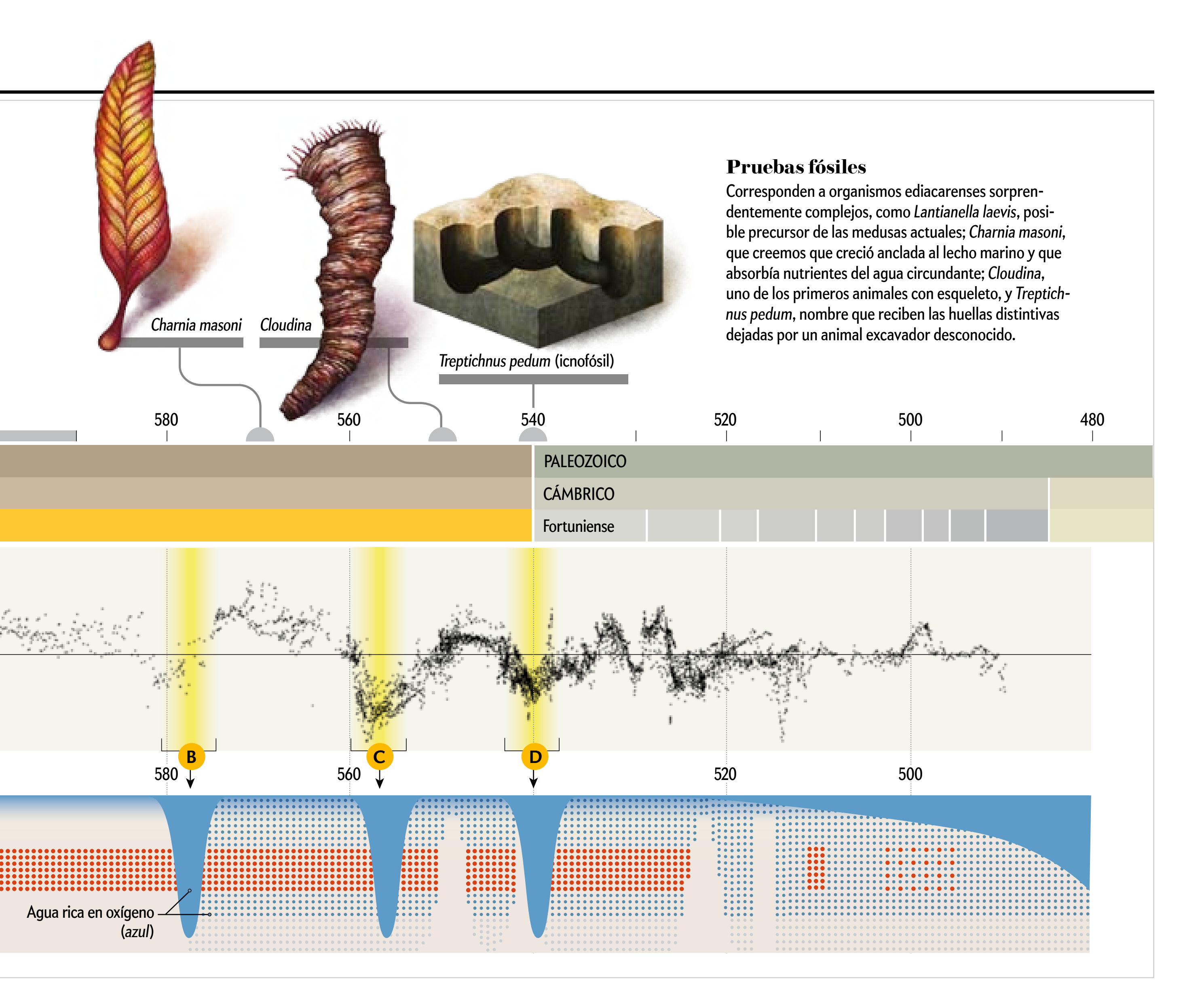
existencia de depredadores en este período, es razonable pensar que el desarrollo de esqueletos podría asociarse a la aparición generalizada de animales que se comían a otros.

MÁS FUERTES JUNTOS

Análisis más recientes de estos esqueletos antiguos nos han proporcionado prometedoras pistas sobre el aspecto que debían tener sus propietarios, y de cómo vivían. Un organismo fósil llamado *Cloudina* ha desempeñado un papel principal en nuestras reconstrucciones de los ecosistemas ediacarenses. Su delicado esqueleto tubular crecía hasta unos 70 milímetros de longitud y parecía una pila de conos de helado. Fue descubierta por primera vez en Namibia en 1972, y durante mucho tiempo se supuso que había crecido enganchada al lecho marino. Pero, en los últimos años, se han identificado en todo el mundo numerosos ejemplares que han hecho cambiar de idea. Gracias al trabajo de mi equipo con especímenes procedentes de Namibia, hemos demostrado que *Cloudina* crecía siguiendo patrones muy diversos. Se podía fijar a tapetes compuestos por microbios que se pegaban al sedimento blando del lecho marino, o se podía anclar ella misma a montículos formados por capas de cianobacterias. Y, lo más importante de todo, los individuos de *Cloudina* podían unirse entre sí para formar un arrecife. Este hallazgo ha motivado que se considerara uno de los primeros animales formadores de arrecifes, haciendo retroceder el récord de esta forma de vida en unos 20 millones de años.

Todavía desconocemos si *Cloudina* estaba emparentada con los creadores actuales de arrecifes, los corales. Pero sí que sabemos que, al igual que los corales que crean arrecifes, vivían teniendo cerca a varios animales diferentes. Las pistas de esta asociación íntima proceden de otros fósiles de esqueletos hallados en rocas de la misma edad que las que contenían los fósiles de *Cloudina*. Un organismo llamado *Namacalathus*, encontrado en yacimientos de fósiles de varias partes del mundo, parece que fue uno de sus compañeros. Su esqueleto, que alcanzaba los 50 milímetros de largo, estaba compuesto por un delicado tallo con paredes delgadas y una copa con una abertura central en su cima y varias aberturas laterales. La mayor parte del tejido blando del animal se concentraba, con toda probabilidad, en el interior de la copa. Los fósiles de *Namacalathus* indican que crecía enraizado en los tapetes microbianos, a menudo cerca de *Cloudina*.

Namapoikia, un organismo hallado únicamente en yacimientos fósiles de Namibia, también se relacionaba con *Cloudi-*



Pruebas fósiles
Corresponden a organismos ediacarenses sorprendentemente complejos, como *Lantianella laevis*, posible precursor de las medusas actuales; *Charnia masoni*, que creemos que creció anclada al lecho marino y que absorbía nutrientes del agua circundante; *Cloudina*, uno de los primeros animales con esqueleto, y *Treptichnus pedum*, nombre que reciben las huellas distintivas dejadas por un animal excavador desconocido.

FUENTE: «INTEGRATED RECORDS OF ENVIRONMENTAL CHANGE AND EVOLUTION CHALLENGE THE CAMBRIAN EXPLOSION», POR RACHEL WOOD ET AL. EN *NATURE ECOLOGY & EVOLUTION*, VOL. 3, ABRIL DE 2019; FRANZ ANTHONY (*fósiles*)

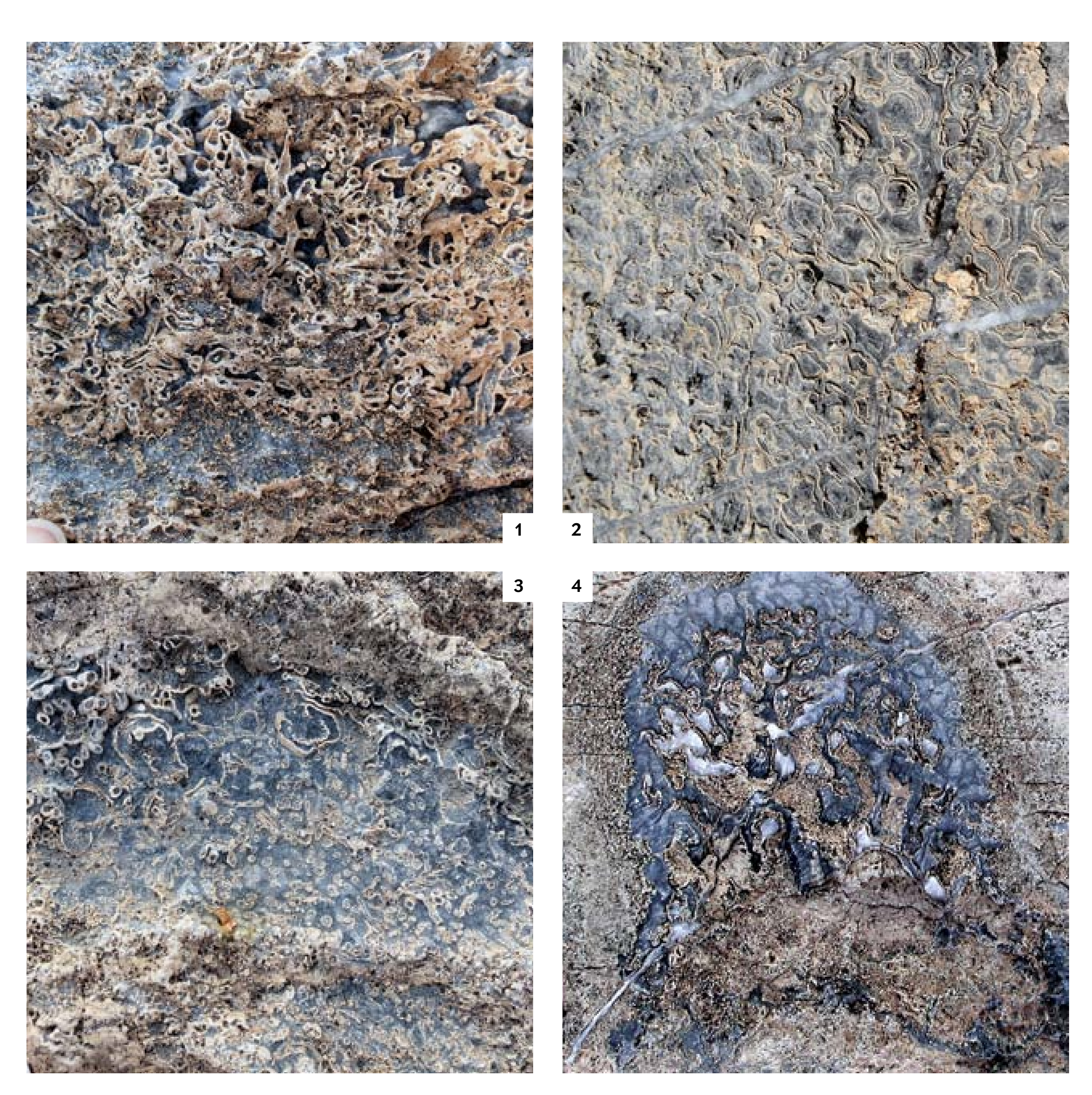
na. Este animal destaca por su gran tamaño, de hasta un metro de diámetro, y por su robusto esqueleto. Basándonos en su forma de crecimiento, creemos que *Namapoikia* era una esponja y por ello habría tenido un esqueleto interno, en lugar de los esqueletos externos que seguramente poseían *Cloudina* y *Namacalathus*. Curiosamente, *Namapoikia* crecía dentro de lugares escondidos entre los corales, incrustada en los recovecos y fisuras de las paredes verticales. En los corales modernos, las comunidades de animales y plantas que viven en superficies abiertas se diferencian de aquellas que ocupan estas zonas más ocultas, como pueden ser cuevas, grietas o bajo techos rocosos. Nuestros descubrimientos de fósiles ediacarenses demuestran que esta distinción es tan antigua como los propios arrecifes de animales.

Estas observaciones son relevantes porque la construcción de arrecifes constituye una innovación ecológica muy importante. Al crecer tan cerca uno de otro, incluso pegándose entre sí, los individuos pueden ganar fuerza mecánica, crecer por encima del lecho marino alejándose de los competidores, alimentarse de forma más eficiente y protegerse de los depredadores. Por lo tanto, al igual que los primeros esqueletos, la apariencia de los arrecifes en el registro fósil ediacarense puede ser una señal de la existencia de presiones ecológicas complejas y crecientes. La explosión cámbrica, y, con ella, una carrera armamentística entre depredador y presa, ya había empezado.

EL MUNDO EDIACÁRICO

A mediados de la década de 2010 empezaba a estar claro que, a diferencia de lo se pensaba desde hacía tiempo, no fue durante el Cámbrico cuando se produjo ese cambio repentino y drástico. Los investigadores no solo empezaron a reunir pruebas de que los animales comenzaron a desarrollar esqueletos y a construir arrecifes mucho antes de lo que se creía, sino que también desarrollaron modelos que mostraban que las comunidades animales ediacarenses compartían muchos rasgos ecológicos con las cámbricas. Estábamos dándonos cuenta de que «la explosión» tenía una mecha mucho más larga de lo que se había pensado hasta ese momento.

Entonces, hace unos pocos años, algunos descubrimientos cruciales realizados en Siberia y China difuminaron todavía más la línea divisoria entre los mundos ediacárico y cámbrico. Un grupo de investigadores de China y Alemania descubrió que *Cloudina* continuaba apareciendo en el Cámbrico. Y mi grupo, junto con colaboradores de Rusia y China, encontró fósiles en



ESCRITO EN PIEDRA: *Cloudina* es uno de los organismos más antiguos que poseen un esqueleto externo, algo que sabemos gracias a los fósiles que conservan su delicada armadura tubular (*1*). Los individuos de *Cloudina* se pueden pegar entre ellos, formando arrecifes. Otra forma temprana que poseía esqueleto es *Namacalathus*, cuyas partes duras en forma de copa se conservan habitualmente en grandes grupos (*2*). A menudo, *Cloudina* y *Namacalathus* se encuentran juntos (*3*). *Namapoikia*, una de las primeras esponjas que crecía en las grietas escondidas del arrecife, también se asociaba con *Cloudina* (*4*).

RACHEL A. WOOD

rocas ediacarenses que durante tiempo se creyó que eran exclusivos del Cámbrico. Estos hallazgos nos dejaron claro que para resolver el misterio de la explosión cámbrica teníamos que descifrar la dinámica del mundo ediacárico en el que se originaron estos animales.

Los investigadores han puesto especial esmero en determinar el papel que habrían desempeñado los cambios en la disponibilidad de oxígeno. Puesto que los animales lo necesitan para vivir, en los últimos años se ha intentado averiguar si en algún momento del Ediacárico o el Cámbrico los niveles de oxígeno crecieron más allá de un valor crítico a partir del cual los animales prosperaron. La cuestión es más complicada de lo que pueda parecer, porque no todos los animales tienen los mismos requerimientos de oxígeno. Algunas formas simples e inmóviles, como las esponjas, tal vez necesiten menos que los animales móviles, y, sin duda, necesitan mucho menos que los depredadores activos que nadan con rapidez. En el curso de nuestras investigaciones hemos tenido en cuenta estas diferencias.

Afortunadamente para nosotros, en los últimos años se han desarrollado muchos métodos geológicos nuevos para calcular el oxígeno que existió en los mares ancestrales. Una técnica poderosa, la especiación de hierro, utiliza las características

de los diversos compuestos del hierro, que se comportan de distinto modo según si el oxígeno se halla o no presente. Este método nos permite ver a escala local dónde y cuándo hubo suficiente oxígeno para que pudiera existir la vida compleja. Los estudios que han utilizado este enfoque nos han llevado a un amplio consenso: en el Ediacárico, el oxígeno disuelto en los océanos alcanzó probablemente un valor crítico (o varios) que permitió a los animales diversificarse, al satisfacerse sus crecientes exigencias metabólicas a medida que se volvieron más móviles y activos.

Ya se han recopilado datos geoquímicos suficientes para que podamos reconstruir cómo se distribuía el oxígeno, no solo en yacimientos ediacarenses concretos de una cierta edad, sino de forma global a lo largo del tiempo. Se ha puesto de manifiesto que, a lo largo del Ediacárico y del Cámbrico temprano, esa distribución difería notablemente de la actual: en muchos lugares, una capa delgada de aguas superficiales bien oxigenadas se situaba encima de otra más gruesa de aguas marinas más profundas y probablemente carentes de oxígeno, un estado conocido como anoxia.

Los datos geoquímicos también demuestran que la frontera entre las aguas con y sin óxigeno fue muy dinámica durante este intervalo, y ascendía y descendía con los cambios del nivel del mar. Las zonas con un lecho marino poco profundo, auténticos oasis de agua con oxígeno disuelto en los que podían vivir los primeros animales resultaron más escasas de lo que esperaban los científicos. Si la diversificación evolutiva que tuvo lugar durante el Ediacárico y el Cámbrico se produjo cuando los niveles de oxígeno eran relativamente bajos, pero con unas condiciones tan dinámicas que fluctuaron en una escala de tiempo ecológico, global y evolutivo, ¿cómo pudieron estos factores haber conformado esa extraordinaria radiación?

¿UN MOTOR DE LA INNOVACIÓN?

Los períodos caracterizados por un incremento de la anoxia en el lecho marino coinciden con algunas de las extinciones en masa más conocidas, como la que marcó el final del Pérmico, hace 252 millones de años, que acabó con más del 90 por ciento de todas las especies marinas. No obstante, varias diversificaciones importantes, como la del Ediacárico-Cámbrico, la del Ordovícico, 100 millones de años después, y la del Triásico medio tardío, hace unos 247 millones de años, empezaron durante largos intervalos de anoxia en aguas marinas superficiales dinámicas. Teniendo en cuenta estos sucesos, junto con Doug Erwin, de la Institución Smithsoniana, hemos conjeturado que las condiciones fluctuantes de oxígeno pudieron haber creado las oportunidades críticas para que se produjera una innovación evolutiva en los animales de cuerpos blandos.

Resulta mucho más fácil para los animales formar un esqueleto de carbonato cálcico, material del que están compuestos los esqueletos y las conchas de numerosos organismos marinos actuales, cuando los niveles de oxígeno del agua marina sobrepasan los 10 micromoles por litro. Puede que los animales de cuerpo blando solo lograran desarrollar esos esqueletos cuando los niveles de oxígeno alcanzaron ese valor límite, lo que habría permitido que los oasis aislados se expandieran, se conectasen entre sí y alcanzaran una estabilidad a escala mundial.

Queda mucho por descubrir sobre cómo debió adaptarse la vida a los cambios en la disponibilidad de oxígeno en la escala de tiempo evolutivo. La respuesta a esos cambios fue probablemente compleja, porque los animales estaban también luchando contra otros factores, como el aumento de la depredación. Y en la ecuación también intervendrían los reajustes que se producían entre los organismos, los ecosistemas y el sistema global terrestre en su conjunto, de los que sabemos muy poco.

Debemos resolver numerosas cuestiones todavía. Los cambios drásticos en los procesos regionales que conformaron la corteza terrestre a lo largo del Ediacárico y el Cámbrico han generado muchas lagunas importantes en el registro geológico y fósil. Ello significa que tenemos que construir la historia del auge de los animales complejos a partir de los datos procedentes de un buen número de localizaciones de todo el mundo. El hecho de que muchos yacimientos ediacarenses clave todavía no se hayan datado bien complica nuestra tarea. Para conocer la edad de estas rocas utilizamos la datación radiométrica uranio-plomo de cristales de circonio presentes en capas cercanas de cenizas, correspondientes a erupciones volcánicas antiguas. Se trata de uno de los pocos métodos que pueden proporcionarnos la edad absoluta de una roca. Pero resulta frustrante que en una gran parte de las sucesiones rocosas que mejor conocemos falten estas importantísimas capas de cenizas. Como resultado de ello, nos es imposible relacionar los cambios evolutivos que se produjeron en diferentes partes del mundo, un paso esencial para crear un marco temporal sólido para nuestro relato de los acontecimientos. Un claro ejemplo es la cuestionada formación Lantian de China, que ha proporcionado los fósiles animales seguramente más antiguos, pero cuya edad podría ser cualquiera entre los 635 y los 590 millones de años.

Sin embargo, existen razones para mostrarse optimista. Se están descubriendo nuevas capas de cenizas y perfeccionando los métodos de datación. Por ejemplo, las capas de cenizas que muchos grupos utilizan para calcular la edad de los fósiles ediacarenses hallados en Namibia se han vuelto a datar hace poco, y las más recientes, cercanas a la frontera entre el Precámbrico y el Cámbrico, han resultado ser más de dos millones de años más jóvenes de lo que se pensaba. Este dato plantea importantes cuestiones sobre cómo pueden relacionarse estos fósiles con sus homólogos hallados en Terranova y Siberia, por citar solo un par de localizaciones clave. Además, los geoquímicos están desarrollando nuevas técnicas isotópicas y otros métodos con los que pueden ofrecer una idea más nítida sobre las condiciones de oxígeno en este mundo ancestral. Y tanto mi equipo como otros estamos hallando nuevos fósiles en lugares remotos desde hace tiempo inexplorados, como es el caso de Siberia.

En algún momento de un futuro no muy distante, cuando desde aquellos acantilados inspeccionemos el inmenso bosque que se extiende a nuestros pies, gozaremos de una comprensión mucho más profunda de este intervalo de tiempo tan extraordinario. IyC

PARA SABER MÁS

Low-oxygen waters limited habitable space for early animals. R. Tostevin et al. en *Nature Communications*, vol. 7, artículo n.º 12818, 23 de septiembre de 2016.

A deep root for the Cambrian Explosion: implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian platform. M. Zhu et al. en *Geology*, vol. 45, n.º 5, págs. 459–462, 1 de mayo de 2017.

Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion. Rachel Wood et al. en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 3, págs. 528–538, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La edad de oro de la evolución animal. Jeffrey S. Levinton en *IyC*, enero de 1993.

Orígenes de la diversidad biológica. Jean Vannier en *IyC*, abril de 2008.

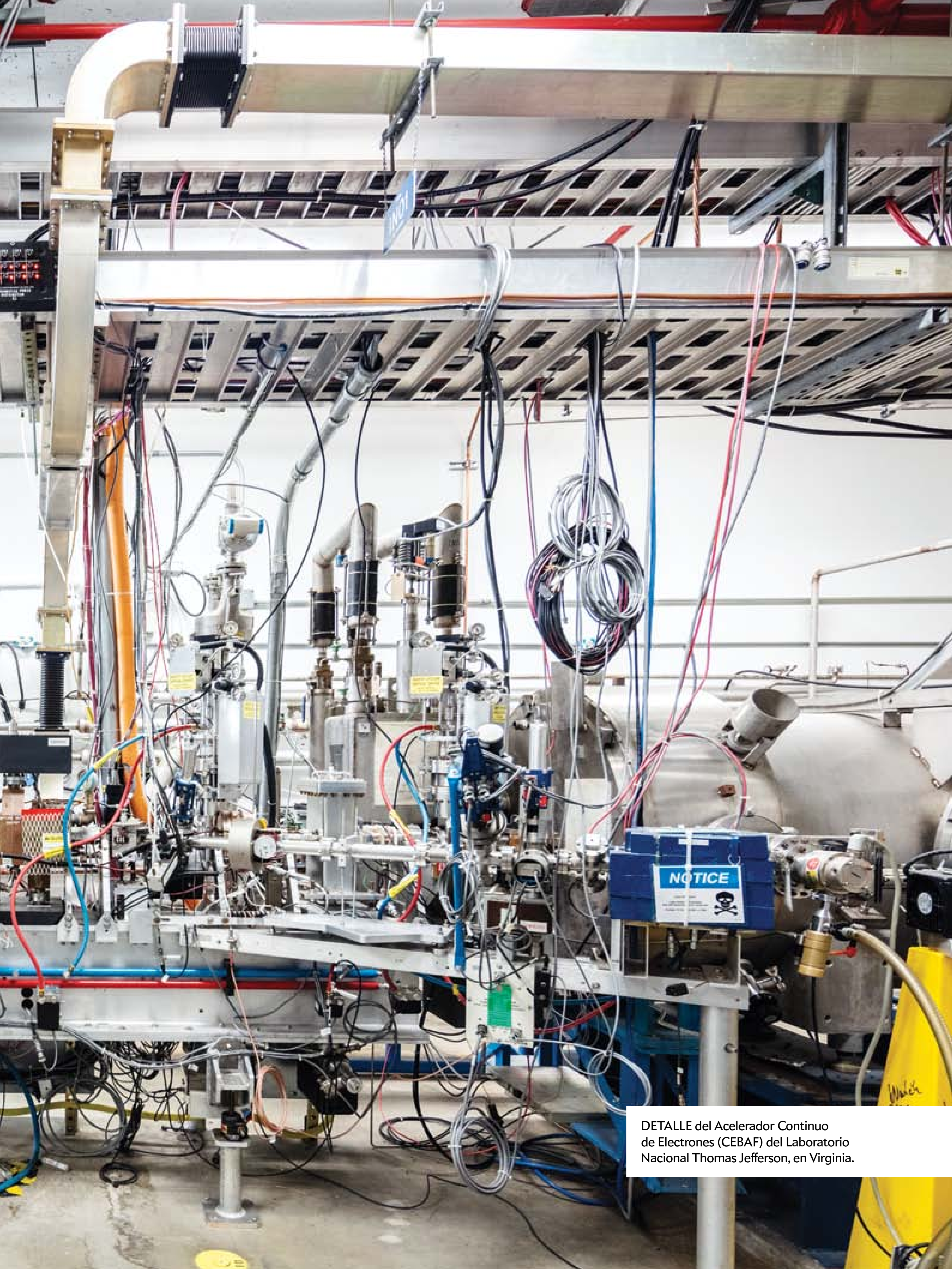
EL ÚLTIMO SECRETO DEL ÁTOMO

Los físicos aún desconocen el origen de la masa y el espín del protón. Un ambicioso proyecto aspira a cartografiar con detalle el interior de esta partícula para averiguarlo

Abhay Deshpande y Rikutaro Yoshida

Fotografías de Floto + Warner

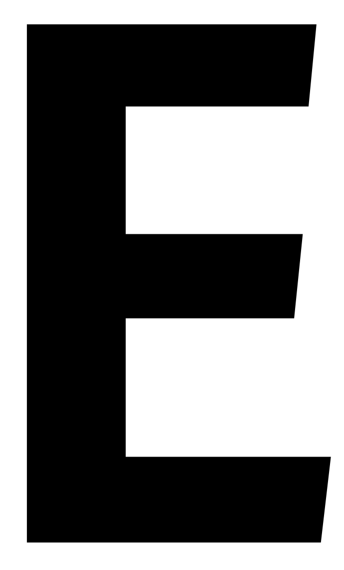




DETALLE del Acelerador Continuo de Electrones (CEBAF) del Laboratorio Nacional Thomas Jefferson, en Virginia.

Abhay Deshpande es catedrático de física de la Universidad de Stony Brook y director del Centro para las Fronteras en Ciencia Nuclear, organismo encargado de desarrollar y promover la construcción del Colisionador de Electrones e Iones (EIC).

Rikutaro Yoshida es científico principal del Laboratorio Nacional Thomas Jefferson y director del Centro EIC, que promueve el programa científico de la futura plataforma experimental.



L UNIVERSO OBSERVABLE CONTIENE APROXIMADAMENTE 10^{53} KILOGRAMOS de materia ordinaria, la mayoría de la cual se concentra en unos 10^{80} protones y neutrones. Junto con los electrones, estas partículas son los constituyentes de los átomos. Pero ¿de dónde procede la masa de los protones y los neutrones?

La respuesta no es sencilla. Los protones y los neutrones, denominados colectivamente nucleones, se componen a su vez de quarks. Estos últimos se mantienen unidos gracias a los gluones. Sabemos que los gluones tienen masa nula, mientras que la masa de los quarks presentes en un nucleón apenas da cuenta de un 2 por ciento de su masa. Así pues, ¿de dónde proviene el resto?

El anterior no es el único misterio de los ladrillos atómicos. El espín de un nucleón tiene también un origen enigmático: al igual que ocurre con la masa, el espín de los quarks no basta para explicar el del nucleón. Los físicos están convencidos que la masa y el espín de los nucleones tienen su origen en las complicadas interacciones entre quarks y gluones, pero la manera exacta en que esto sucede resulta desconocida. El conocimiento teórico al respecto es limitado, ya que las interacciones entre quarks y gluones se hallan gobernadas por la cromodinámica cuántica, una teoría extremadamente difícil de resolver.

Para progresar en este frente necesitamos datos experimentales. Es aquí donde entra el Colisionador de Electrones e Iones (EIC, por sus siglas en inglés). A diferencia de otros aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Europa, o el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC), en EE.UU., donde solo chocan partículas compuestas, el propósito del EIC es hacer colisionar protones y neutrones contra electrones. Estos últimos son partículas puntuales, sin estructura interna, por lo que resultan ideales para usarlas a modo de microscopio y explorar el interior de los nucleones.

El EIC constituye una de las mayores prioridades de la comunidad nuclear de Estados Unidos. Lo más probable es que se construya en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Nueva York, o en el Laboratorio Nacional Thomas Jefferson, en Virginia. Si el proyecto se aprueba, podría comenzar a tomar datos en 2030. Esta máquina podrá ver cómo los quarks y los gluones contribuyen a la masa y el espín del protón y el neutrón. Y también responderá a otras cuestiones, como si quarks y gluones se concentran en ciertas regiones del nucleón o si, por el contrario, se distribuyen de manera uniforme. Sus datos proporcionarán información esencial para entender la manera en que las partículas elementales interaccionan y dan forma al universo que vemos. Cincuenta años después del descubrimiento de los quarks, estamos finalmente en posición de desentrañar sus secretos.

FENÓMENOS EMERGENTES

Los científicos entienden bastante bien la forma en que la materia ordinaria se halla compuesta por átomos y cómo las propiedades de la primera se derivan de las de los segundos. No en vano, la vida moderna depende de manera clave de nuestro conocimiento sobre los átomos, los electrones y las interacciones electromagnéticas. Gracias a ello funcionan nuestros automóviles y teléfonos móviles. Así las cosas, ¿cómo es posible que no entendamos la manera en que quarks y gluones forman los nucleones?

EN SÍNTESIS

Los físicos siguen sin entender cómo surgen la masa y el espín de protones y neutrones. Tales propiedades han de emerger a partir de las complejas interacciones entre quarks y gluones, pero el mecanismo preciso sigue siendo un misterio.

Un nuevo proyecto, el Colisionador de Electrones e Iones (EIC, por sus siglas en inglés), propone usar electrones de alta energía para sondear nucleones y confeccionar así un mapa tridimensional del interior de estas partículas.

Actualmente el EIC es el único proyecto en todo el mundo que aspira a conseguir tales objetivos. Sus resultados permitirán obtener un conocimiento mucho más profundo de las interacciones fuertes y de la física nuclear.



ESTOS IMANES DIPOLARES (*azul*) permiten estabilizar los haces de electrones del CEBAF a medida que las partículas se aceleran.

Para empezar, los quarks son unas 10.000 veces menores que los protones, lo que dificulta enormemente su estudio. Además, las características de los nucleones surgen principalmente del comportamiento colectivo de quarks y gluones. Los nucleones constituyen, de hecho, un fenómeno emergente: el resultado de las interacciones entre un gran número de elementos cuyas consecuencias resultan muy difíciles de establecer.

La teoría que gobierna estas interacciones, la cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés), se desarrolló a principios de los años setenta del pasado siglo. Forma parte del modelo estándar, el marco teórico que describe todas las interacciones conocidas de la naturaleza a excepción de la gravedad. Y, del mismo modo que el electromagnetismo puede entenderse como una interacción mediada por fotones (partículas de luz), la QCD describe las interacciones entre quarks mediante el intercambio de gluones. En QCD, el equivalente a la carga eléctrica lo desempeña otro tipo de carga, denominada metafóricamente «carga de color». Pero, a diferencia del electromagnetismo, en el que las partículas mediadoras (los fotones) carecen de carga eléctrica, los gluones presentan carga de color. Como consecuencia, interaccionan entre sí intercambiando otros gluones. Ello tiene profundas implicaciones: la retroalimentación que implica hace que a menudo resulte muy difícil efectuar predicciones.

Hay otro aspecto en el que la QCD se diferencia de las demás fuerzas de la naturaleza: la intensidad de las interacciones entre quarks disminuye cuando estos se acercan unos a otros (en el electromagnetismo ocurre justo lo contrario: la interacción entre cargas eléctricas aumenta cuando estas se aproximan). A distancias lo suficientemente pequeñas, los quarks se comportan como partículas casi libres. Esta interesante propiedad fue descubierta en 1973 por David Gross, Frank Wilczek y David Politzer, quienes en 2004 recibirían por ello el premio Nobel de física. Sin embargo, si intentamos separar un quark del protón, la fuerza correspondiente crecerá. Los quarks viven confinados en el interior de los nucleones y otras partículas similares, razón por la que nunca se observan aislados. Los físicos son capaces de predecir su comportamiento cuando se hallan muy cerca unos de otros e interaccionan débilmente. Pero, cuando se encuentran separados —donde «separados» quiere decir a distancias próximas al radio del protón—, sus interacciones resultan muy difíciles de calcular.

Para entender los misterios de las interacciones fuertes necesitamos más información. Nuestro dominio del átomo no proviene solo de nuestro conocimiento sobre la interacción entre electrones y nucleones, sino también de los fenómenos emergentes que surgen de esas interacciones. Tampoco fue posible construir la biología molecular a partir de la teoría de las interacciones entre electrones y protones: la clave la proporcionaron hallazgos como el de la estructura de doble hélice del ADN. De igual modo, lo que necesitamos para progresar en nuestro conocimiento sobre quarks y gluones es examinar a conciencia el interior de un núcleo atómico.

«VER» LOS ÁTOMOS

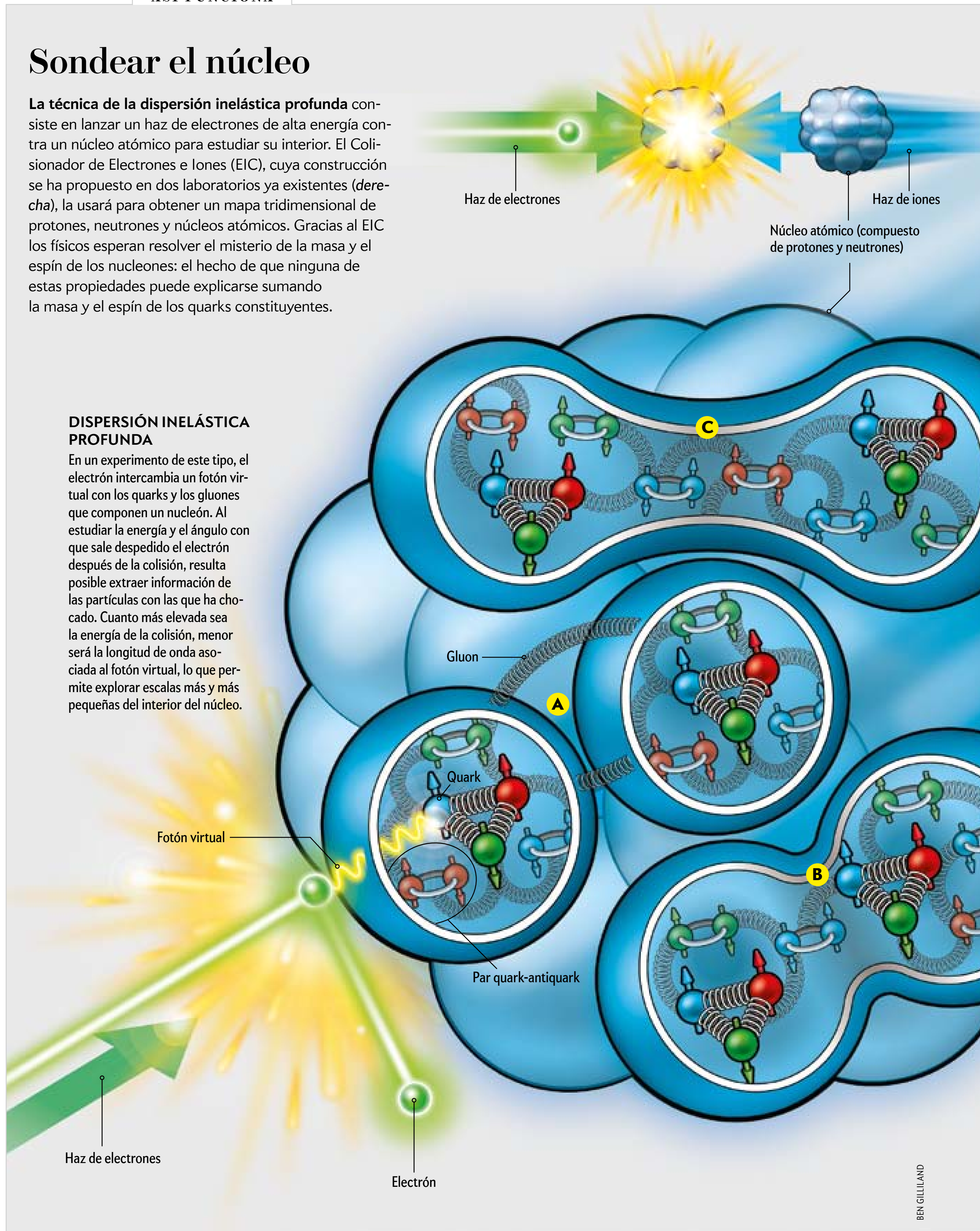
En la primera mitad del siglo XX, los físicos descubrieron una manera de «ver» los átomos gracias a una técnica llamada difracción de rayos X. Al lanzar un haz de rayos X contra un objeto y estudiar el patrón de interferencia que se forma

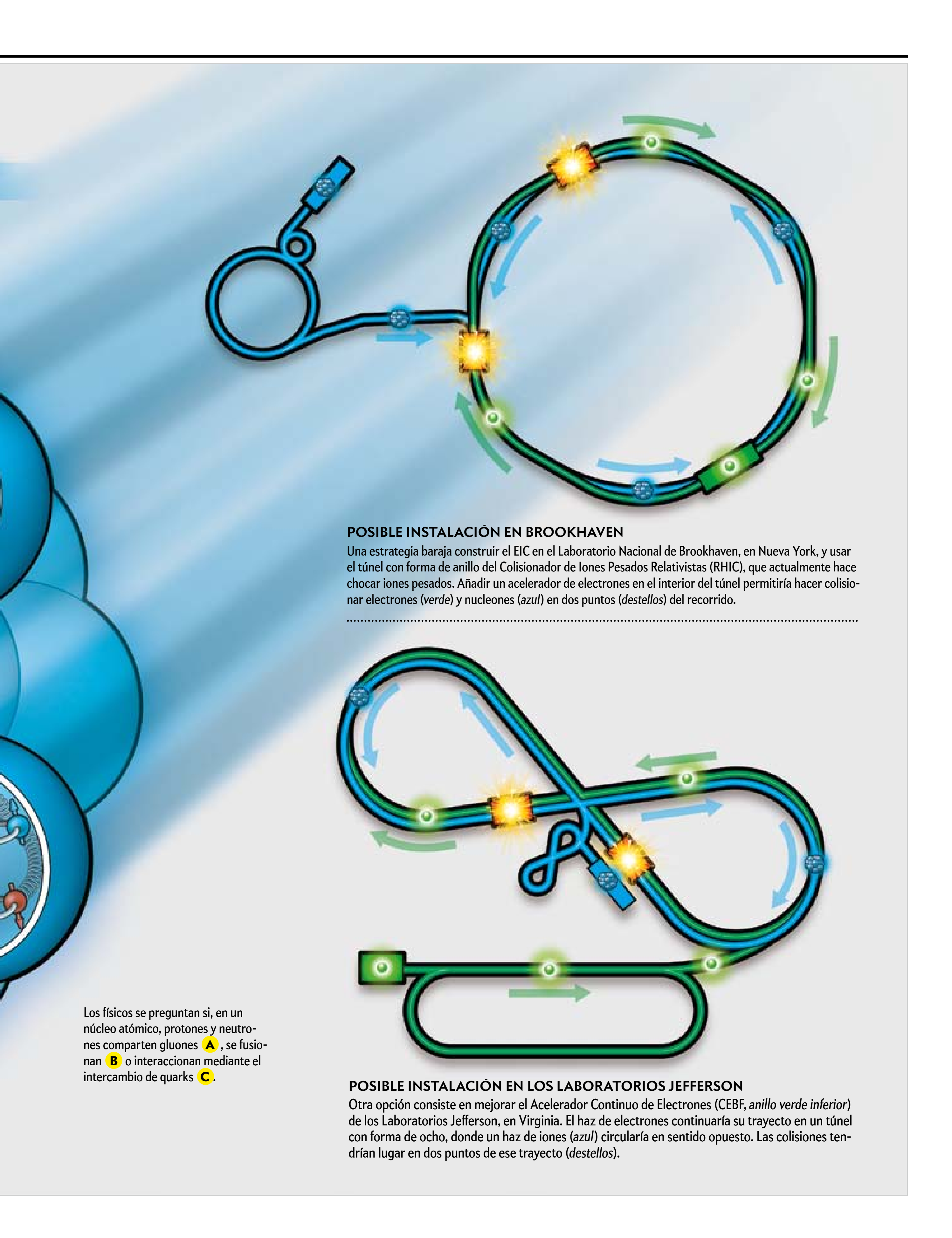
Sondear el núcleo

La técnica de la dispersión inelástica profunda consiste en lanzar un haz de electrones de alta energía contra un núcleo atómico para estudiar su interior. El Colisionador de Electrones e Iones (EIC), cuya construcción se ha propuesto en dos laboratorios ya existentes (*derecha*), la usará para obtener un mapa tridimensional de protones, neutrones y núcleos atómicos. Gracias al EIC los físicos esperan resolver el misterio de la masa y el espín de los nucleones: el hecho de que ninguna de estas propiedades puede explicarse sumando la masa y el espín de los quarks constituyentes.

DISPERSIÓN INELÁSTICA PROFUNDA

En un experimento de este tipo, el electrón intercambia un fotón virtual con los quarks y los gluones que componen un nucleón. Al estudiar la energía y el ángulo con que sale despedido el electrón después de la colisión, resulta posible extraer información de las partículas con las que ha chocado. Cuanto más elevada sea la energía de la colisión, menor será la longitud de onda asociada al fotón virtual, lo que permite explorar escalas más y más pequeñas del interior del núcleo.





Los físicos se preguntan si, en un núcleo atómico, protones y neutrones comparten gluones **A**, se fusionan **B** o interaccionan mediante el intercambio de quarks **C**.

POSIBLE INSTALACIÓN EN BROOKHAVEN

Una estrategia baraja construir el EIC en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Nueva York, y usar el túnel con forma de anillo del Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC), que actualmente hace chocar iones pesados. Añadir un acelerador de electrones en el interior del túnel permitiría hacer colisionar electrones (*verde*) y nucleones (*azul*) en dos puntos (*destellos*) del recorrido.

POSIBLE INSTALACIÓN EN LOS LABORATORIOS JEFFERSON

Otra opción consiste en mejorar el Acelerador Continuo de Electrones (CEBF, *anillo verde inferior*) de los Laboratorios Jefferson, en Virginia. El haz de electrones continuaría su trayecto en un túnel con forma de ocho, donde un haz de iones (*azul*) circularía en sentido opuesto. Las colisiones tendrían lugar en dos puntos de ese trayecto (*destellos*).



EL COLISIONADOR de Iones Pesados Relativistas (RHIC, *imagen*), en Brookhaven, acelera núcleos atómicos de gran tamaño.

LABORATORIO NACIONAL DE BROOKHAVEN

cuando los rayos lo atraviesan, es posible deducir la estructura cristalina (la disposición de los átomos) del material. Este método funciona porque la longitud de onda de los rayos X es similar al tamaño de los átomos. Hace 50 años, algo parecido permitió «ver» los quarks en el interior de los protones. Ello se logró gracias a un experimento que hacía colisionar electrones contra protones, un método conocido como «dispersión inelástica profunda».

En estos experimentos, el electrón incidente es dispersado («rebota») debido a que interacciona con el protón mediante el intercambio de un fotón virtual. Este fotón no es «real» en el sentido habitual de la palabra, sino que aparece y desaparece de manera casi instantánea como consecuencia de las leyes de la mecánica cuántica. Al medir con precisión la energía y el ángulo del electrón dispersado, podemos obtener información del objeto contra el que colisionó.

La longitud de onda asociada al fotón virtual en estos experimentos es del orden del femtómetro (10^{-15} metros), aproximadamente el diámetro de un protón. Cuanto mayor sea la energía de la colisión, menor será la longitud de onda correspondiente, lo que permite explorar detalles del protón cada vez más finos. Si la energía es lo suficientemente elevada, el electrón será dispersado por los quarks que componen el protón (en lugar de por el protón en conjunto). Esto hace posible observar su estructura interna.

Los primeros experimentos de dispersión inelástica profunda tuvieron lugar en 1968 en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC). Sus datos aportaron la primera prueba experimental de la existencia de los quarks, un hallazgo que en 1990 les valió a los líderes del experimento el premio Nobel de física. Más tarde, esta técnica permitió comprobar que los quarks en el interior de protones o neutrones libres se comportan de manera muy distinta a como lo hacen en el seno de un núcleo atómico. Además, se descubrió que la mayor parte del espín del protón no podía explicarse como consecuencia del espín de los quarks. Aquel hallazgo fue bautizado como la «crisis del espín del protón».

El primer experimento de dispersión inelástica profunda en el que se aceleraron tanto protones como electrones antes de hacerlos colisionar fue el Anillo Acelerador de Hadrones y Electrones (HERA) de Hamburgo. Esta instalación operó desde 1992 hasta 2007 y mostró que el protón no era la partícula simple formada por tres quarks que habíamos pensado hasta entonces, sino algo más parecido a una sopa de quarks y gluones. Sin embargo, aunque el HERA dio un paso de gigante en nuestro entendimiento del protón, no logró resolver la crisis del espín. Tampoco podía hacer colisionar los núcleos necesarios para estudiar el comportamiento de quarks y gluones en el interior del núcleo atómico.

Algo que complica aún más las observaciones a tales escalas son las extrañas reglas de la mecánica cuántica. Esta describe las partículas como nubes de probabilidad, no como entes con propiedades bien definidas y localizados en posiciones e instantes precisos. En su lugar, debemos imaginar los quarks como algo que existe a la vez en una infinidad de estados. Otro fenómeno que complica las cosas es el entrelazamiento cuántico, en el que dos partículas pueden tener destinos correlacionados incluso cuando se encuentran muy separadas. El entrelazamiento cuántico introduce un problema fundamental a la hora de estudiar el mundo subatómico, ya que los quarks y los gluones que queremos observar pueden entrelazarse con las partículas que usamos para medirlos (el fotón virtual, en el caso de los experimentos de dispersión inelástica profunda). Parece complicado averiguar qué es un nucleón cuando los datos que obtenemos dependen de lo que hemos usado para observarlo.

Por fortuna, nuestro conocimiento de las interacciones fuertes es lo bastante completo para saber que, bajo ciertas condiciones, las características del protón y las del electrón pueden separarse, una propiedad denominada «factorización». A energías lo suficientemente elevadas, los efectos del entrelazamiento pueden ignorarse bajo determinadas circunstancias. Ello basta para describir la estructura del protón en una dimensión. Eso quiere decir que podemos estimar cuánto contribuyen los quarks y gluones al momento del protón en su dirección de movimiento. En fecha reciente, varios avances teóricos han hecho posible estudiar la estructura interna de los nucleones en más de una dimensión. En otras palabras: no solo cuánto contribuyen los quarks y los gluones al momento del protón en su dirección de movimiento, sino también cómo se mueven de lado a lado en el interior del nucleón. Con todo, el verdadero avance llegará con el EIC.

EL COLISIONADOR DE ELECTRONES E IONES

El EIC será capaz de cartografiar en 3D el interior de un nucleón. Esperamos que sea capaz de medir la distribución de quarks y gluones en el interior del protón, así como su contribución relativa al espín y la masa totales. La diferencia fundamental entre el EIC y los experimentos anteriores será lo que los físicos

llaman «luminosidad», una medida del número de colisiones. El EIC producirá entre 100 y 1000 veces más colisiones por minuto que el HERA. Además, la elevada energía de los haces permitirá explorar distancias mucho más pequeñas en el interior del protón, hasta 100 veces menores que su radio. Ello hará posible investigar regiones en las que un gran número de quarks y gluones aportan una pequeña parte (del orden del 0,01 por ciento cada uno) al momento total del protón. El EIC permitirá además controlar el alineamiento del espín de las partículas, gracias a lo cual podremos estudiar cómo emerge el espín del protón a partir de las interacciones fuertes. Junto con nuestros modelos teóricos, el EIC hará posible confeccionar un verdadero mapa tridimensional del protón en términos de quarks y gluones.

Son muchas las preguntas que esperamos resolver. ¿Se distribuyen los constituyentes del protón de manera uniforme o se agrupan en ciertas zonas? ¿Cuáles son las características de las partículas que más contribuyen a la masa y el espín del protón? ¿Qué papel preciso desempeñan los quarks y los gluones a la hora de mantener unidos a protones y neutrones en el interior del núcleo atómico? Los experimentos actuales han comenzado a dar respuesta a estos interrogantes a distancias del orden del femtómetro, pero solo el EIC nos proporcionará la imagen completa.

Unos de los mayores misterios relativos al protón es su estructura a muy cortas distancias. Cuando analizamos lo que sucede en su interior a escalas diminutas, comienzan a pasar cosas extrañas. La QCD predice que, cuanto mayor sea la energía a la que estudiemos el protón, más gluones encontraremos. Los quarks pueden radiar gluones y estos, a su vez, pueden radiar otros gluones, lo que provoca una especie de reacción en cadena. Por raro que parezca, no es la colisión con el haz incidente lo que provoca esta miríada de nuevas partículas, sino las complejas reglas de la mecánica cuántica: sencillamente, hay más gluones cuanto más de cerca observamos un protón.

Sin embargo, sabemos también que este fenómeno debe tener un límite. Experimentos anteriores, HERA incluido, han observado indicios de una «saturación»: un momento en el que los gluones empiezan a recombinarse, lo que cancela el crecimiento en el número de partículas. Sin embargo, hasta ahora no ha sido posible obtener una prueba inequívoca de este fenómeno. Algunos cálculos sugieren que la saturación en el número de gluones formaría un nuevo estado de la materia, bautizado como «condensado vítreo de color» (*color glass condensate*, donde el término *vítreo* hace referencia al carácter amorfo, no cristalino, de ese material). Dicho estado tendría propiedades extraordinarias. Por ejemplo, la densidad de energía de los gluones podría ser entre 50 y 100 veces mayor que la que reina en el interior de una estrella de neutrones. Con miras a alcanzar ese estado y estudiarlo en detalle, el EIC usará núcleos pesados en lugar de protones.

LA CONSTRUCCIÓN DEL EIC

Los planes para la construcción del nuevo acelerador han recibido un fuerte apoyo por parte de la comunidad nuclear de EE.UU. y el Departamento de Energía del país, que en 2017 solicitó una evaluación independiente a la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina. En julio de 2018, este organismo concluyó que las razones científicas para construir el EIC eran sólidas y llegaban en buen momento.

Hay dos posibilidades para construir esta máquina. La primera pasa por remodelar el experimento RHIC de Brookhaven. Este proyecto, llamado eRHIC, conlleva incorporar un haz de electrones al túnel del acelerador y hacer que electrones e iones colisionen en dos puntos del túnel. La segunda se basa en usar el haz de electrones del Acelerador Continuo de Electrones (CEBF) de los Laboratorios Jefferson, donde el haz de esta máquina se desviaría hacia un túnel de nueva construcción.

Cualquiera de estas opciones aumentaría en enorme medida nuestro entendimiento de las interacciones fuertes. Nos permitiría atisbar en el interior del protón y resolver las cuestiones fundamentales acerca de su masa y su espín. Y con cualquiera de ellas será posible hacer colisionar núcleos de oro, plomo o uranio, gracias a lo cual podremos averiguar cómo se comportan los quarks y los gluones en el seno de los núcleos atómicos pesados y si, por ejemplo, dos protones «comparten» gluones.

¿FEMTOTECNOLOGÍA?

En el sigo xxi, el principal factor limitante de nuestra tecnología es el tamaño del átomo. Sin un avance revolucionario, la escala de los 10 nanómetros (unas cien veces el tamaño de un átomo típico) será el límite que alcancen los componentes electrónicos. Ello sugiere que la potencia de cálculo de nuestras máquinas dejará de aumentar al ritmo al que ha venido haciéndolo desde hace 50 años.

Sin embargo, la física de los nucleones se desarrolla en una escala millones de veces menor. Las interacciones fuertes que gobiernan este mundo son 100 veces más intensas que las interacciones electromagnéticas que rigen el mundo de la electrónica. ¿Es posible una «femtotecnología» que funcione manipulando quarks y gluones? Usando cierta vara de medir, cabe afirmar que dicha tecnología sería millones de veces más potente que la actual. Se trata de una idea especulativa y referida a un futuro lejano, pero para llegar hasta ella primero debemos entender bien el mundo cuántico de los quarks y los gluones.

El EIC es la única propuesta experimental en todo el mundo que aspira a obtener la información necesaria para lograr una comprensión completa de las interacciones fuertes. Su construcción no está exenta de retos. Será necesario generar haces intensos y muy focalizados de electrones, protones y otros núcleos atómicos más pesados, así como provocar entre 100 y 1000 veces más colisiones por minuto que el experimento HERA. Estudiar el espín del nucleón exigirá producir haces en los que el espín de las partículas esté muy bien alineado y pueda controlarse. Estos retos demandan innovaciones que prometen transformar la física de aceleradores. Ello no solo repercutiría en el beneficio de la física nuclear, sino también en el de los aceleradores usados en medicina, física de materiales y física de partículas. IyC

PARA SABER MÁS

An assessment of U.S.-based electron-ion collider science. Academia Nacional de Ciencias, Ingeniera y Medicina de EE.UU. National Academies Press, 2018.

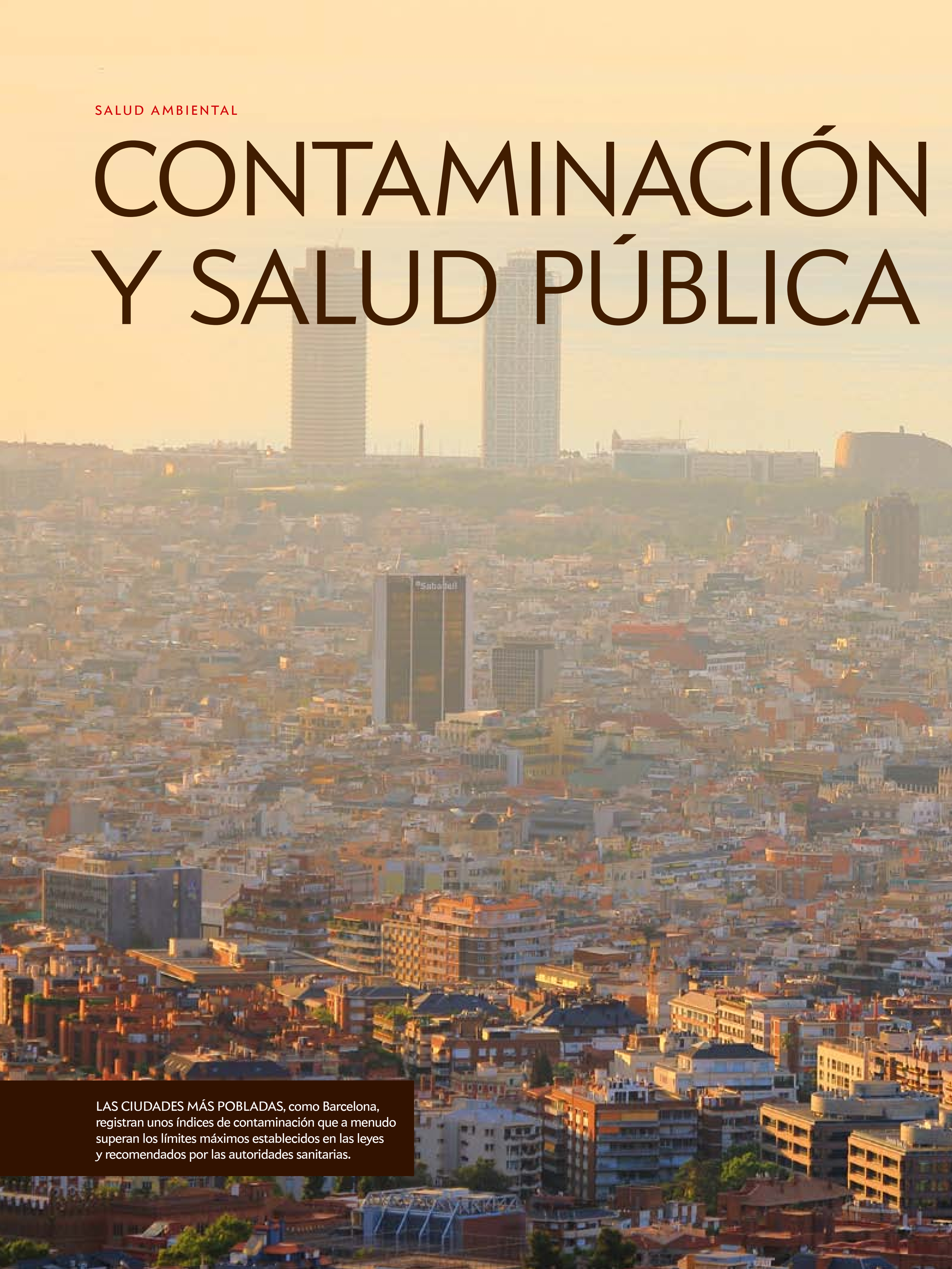
EN NUESTRO ARCHIVO

El confinamiento de los quarks. Yoichiro Nambu en *IyC*, enero de 1977. Reeditado para el monográfico «Grandes ideas de la física», colección *Temas* de *IyC*, n.º 80, 2015.

Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.

Las enigmáticas propiedades de los gluones. Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan en *IyC*, julio de 2015.

CONTAMINACIÓN Y SALUD PÚBLICA



LAS CIUDADES MÁS POBLADAS, como Barcelona, registran unos índices de contaminación que a menudo superan los límites máximos establecidos en las leyes y recomendados por las autoridades sanitarias.

ATMOSFÉRICA

Los efectos de la polución en la salud suelen ser difíciles de observar a nivel individual. ¿Cómo puede mejorarse ese conocimiento y aumentar la concienciación de la población ante el problema?

Mark J. Nieuwenhuijsen



Mark J. Nieuwenhuijsen es profesor de investigación en ISGlobal, en Barcelona, donde dirige la Iniciativa de Planificación, Medio Ambiente y Salud. También es presidente de la Sociedad Internacional de Epidemiología Ambiental. Su último libro se titula *Integrating human health into urban and transport planning* (Springer, 2018).





A la mayoría de nosotros nos acecha una de las mayores amenazas, un mal que no suele detectarse a simple vista pero que descarga su golpe mortal en numerosas zonas del planeta. Se trata de la contaminación atmosférica. El 90 por ciento de la población mundial vive en áreas donde los niveles de contaminantes atmosféricos se sitúan por encima de los valores recomendados por las directrices sanitarias.

Según diferentes estudios, las sustancias tóxicas y las partículas sólidas del aire derivadas de diversas actividades humanas terminan con la vida de 7 millones de personas cada año; más de la mitad (4,2 millones) mueren como consecuencia de los contaminantes presentes en espacios abiertos (el resto fallece a causa de los que se generan en espacios cerrados, como en los hogares donde se quema leña). Los índices de contaminación atmosférica varían mucho de una región a otra del planeta, siendo elevados en lugares como China e India y menores en América del Norte y Europa. Aun así, cerca de 400.000 europeos mueren cada año a causa de ella.

La polución del aire repercute, además, en los sistemas sanitarios y la economía de las naciones: en 2016, el coste asociado a la carga de enfermedad provocada por las partículas sólidas de tamaño inferior a 2,5 micrómetros ($PM_{2,5}$) en todo el mundo fue de 5,7 billones (10^{12}) de dólares estadounidenses, lo que representa un 4,4 por ciento del producto interior bruto global.

Muchos de los contaminantes están regulados y existen directrices que definen sus niveles máximos. Las $PM_{2,5}$ y el dióxido de nitrógeno (NO_2) han recibido gran parte de la atención por su mayor impacto sobre la salud. A pesar de ello, en numerosas ciudades europeas, entre ellas Barcelona y Madrid, se superan esos límites. A menudo, reducirlos supone una dura batalla para las administraciones, dada la elevada densidad de coches en las ciudades y la escasa predisposición a restringir su uso.

La concienciación de la población sobre el problema de la contaminación, aunque cada vez mayor, resulta irregular. El caso *dieselgate,* en el que los fabricantes de coches manipularon las emisiones de los óxidos de nitrógeno de los motores diésel para que disminuyeran durante las pruebas de homologación, fue ampliamente cubierto por los medios de comunicación y aumentó la atención y la necesidad de actuar sobre dichos contaminantes.

No obstante, cada cierto tiempo aparecen personas que cuestionan los efectos de la contaminación en la salud, como Dieter Köhler, antiguo director de la Sociedad Respiratoria Alemana, que hace poco puso en entredicho las pruebas sobre el impacto del NO_2. Argumentaba que la mayoría de ellas se basaban en asociaciones estadísticas y que él nunca había visto a nadie en su consulta que sufriera daños provocados por la contaminación atmosférica, como sí había visto las consecuencias del tabaquismo.

Es verdad que muchos de los efectos descritos proceden de estudios epidemiológicos (basados en poblaciones grandes) y son difíciles de detectar a escala individual. Pero también existen numerosas pruebas toxicológicas, realizadas en condiciones experimentales en animales y en humanos, que respaldan los hallazgos epidemiológicos.

Aun así, todavía existen lagunas de conocimiento y persisten dudas en la población sobre el problema de la polución. ¿Cuándo tienen los contaminantes un efecto perjudicial notable en la salud individual? ¿Qué estrategias pueden mejorar dicho conocimiento y aumentar la concienciación de los ciudadanos?

UN PROBLEMA HISTÓRICO

Aunque los posibles efectos de la contaminación atmosférica se han descrito durante cientos de años, no fue hasta principios de la década de 1950 cuando pasaron a un primer plano e indujeron cambios en la legislación.

Uno de los acontecimientos clave tuvo lugar en diciembre de 1952 en Londres. A causa de la combustión intensiva de carbón para la calefacción doméstica y del estancamiento de

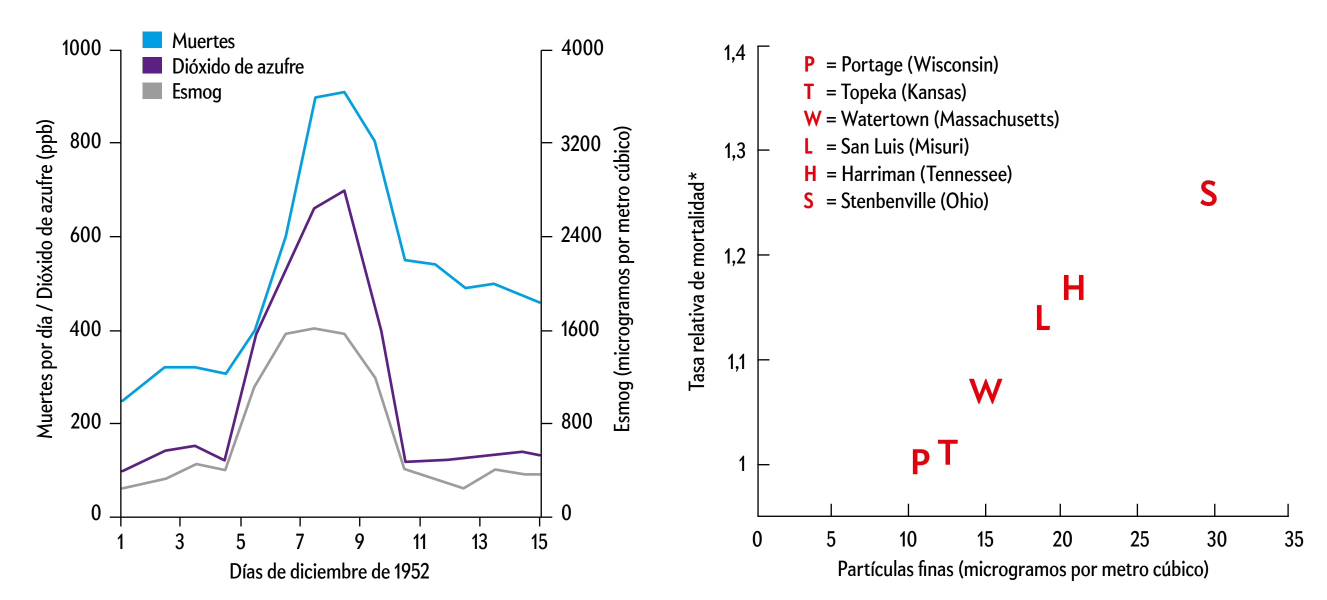
PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/IMV/ISTOCK

EN SÍNTESIS

Se sabe que la contaminación atmosférica causa enfermedades y aumenta la mortalidad, por lo que numerosos países han desarrollado legislaciones para reducirla.

Sin embargo, todavía existen lagunas en el conocimiento de los efectos en la salud, sobre todo los de niveles muy bajos de contaminantes a largo plazo. Asimismo, la percepción de la población acerca de las repercusiones en la salud individual es pobre.

Diferentes estrategias pueden mejorar ese conocimiento y aumentar la concienciación de la sociedad, como el estudio del exposoma, los proyectos de ciencia ciudadana para medir la contaminación local o las iniciativas de reducción del tráfico motorizado en las urbes.



CONTAMINACIÓN Y MORTALIDAD: El episodio de niebla tóxica de Londres en 1952, en el que se vio un pico de fallecimientos relacionado con los niveles de contaminantes, como dióxido de azufre y esmog (*izquierda*), dio pie a la introducción de leyes para reducir la contaminación. Más tarde, en los años noventa, el Estudio de las Seis Ciudades de EE.UU. demostró que, incluso para valores inferiores de contaminantes, como las partículas finas, se daba una relación lineal entre estos y la tasa relativa de mortalidad en las diferentes urbes. (*Cociente ajustado de la tasa de mortalidad con respecto a la de la ciudad más salubre.)

FUENTES: DATOS DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DEL REINO UNIDO (*izquierda*); «AN ASSOCIATION BETWEEN AIR POLLUTION AND MORTALITY IN SIX U.S. CITIES». DOUGLAS W. DOCKERY ET AL. EN *NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE*, VOL. 329, PÁGS. 1753-1759, DICIEMBRE DE 1993 (*derecha*)

las condiciones meteorológicas, se alcanzaron valores máximos de contaminación atmosférica. Se dio uno de los episodios de niebla tóxica que daban fama a la ciudad, al que siguió, al cabo de pocos días, un pico en el número de fallecimientos, 4000 en total. Tras ese episodio, se introdujo en el país la Ley de Aire Limpio, que supuso la prohibición del carbón y redujo en gran medida la contaminación en Londres y el resto del Reino Unido. La niebla tóxica no volvió a verse en la ciudad, pero, por desgracia, en algunos lugares del mundo, como China, siguen produciéndose ese tipo de episodios.

Desde los años cincuenta, a raíz de las nuevas legislaciones y la intensificación del control sobre las emisiones industriales, la combustión de carbón se redujo o se eliminó por completo en América del Norte y Europa. Durante tiempo se consideró que la contaminación en esas regiones se había reducido tanto que no existía riesgo alguno para la salud. Sin embargo, un estudio de 1993 de Douglas W. Dockery, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores, cambió esa forma de pensar. Conocido como el Estudio de las Seis Ciudades (Six-Cities Study), consistió en colocar monitores de aire en seis urbes estadounidenses con distintos índices de contaminación; en cada una de ellas, se hizo un seguimiento del estado de salud y la mortalidad de varios miles de personas. Los resultados, que abarcaron un período de entre 14 y 16 años, demostraron que las personas de las poblaciones más contaminadas presentaban un 30 por ciento más de posibilidades de fallecer que las de las ciudades menos contaminadas. Se observó que la mortalidad guardaba una relación especialmente estrecha con los niveles de partículas sólidas finas. Como consecuencia de ese estudio, en los Estados Unidos se desarrolló una legislación más estricta, y en todo el mundo, en especial en América del Norte y Europa, se intensificaron las investigaciones sobre los efectos de la contaminación en la salud.

Muchos de esos trabajos correspondían a lo que se conoce como estudios de series de tiempo (en los que se miden las variables de interés a intervalos de tiempo regulares). Varios de ellos examinaron la relación entre los valores diarios de contaminantes y el número de personas fallecidas o enfermas en un determinado día y ciudad. Mediante complejas técnicas estadísticas, se detectaron tendencias pequeñas. Se descubrió así que, en términos generales, cuando aumentaban los valores de contaminantes, también lo hacía el número de personas que fallecían o enfermaban. Se observó un resultado parecido al del episodio de niebla tóxica de Londres, pero con valores más bajos de contaminantes y también un número muy inferior de fallecimientos.

Por lo que respecta a las enfermedades, los primeros estudios se centraron en los efectos de la contaminación sobre el asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y la función pulmonar. Les siguieron estudios sobre enfermedades cardiovasculares. Y más tarde se exploraron las alteraciones en el feto y el cerebro. Tal evolución resulta lógica: los pulmones constituyen el primer órgano donde va a parar el aire contaminado que inhalamos; pero después se demostró que otros órganos sufrían también daños porque a partir de los pulmones los contaminantes se incorporan al torrente sanguíneo, desde donde son distribuidos por todo el cuerpo, atravesando incluso la placenta y la barrera hematoencefálica.

UNA MEZCLA COMPLEJA

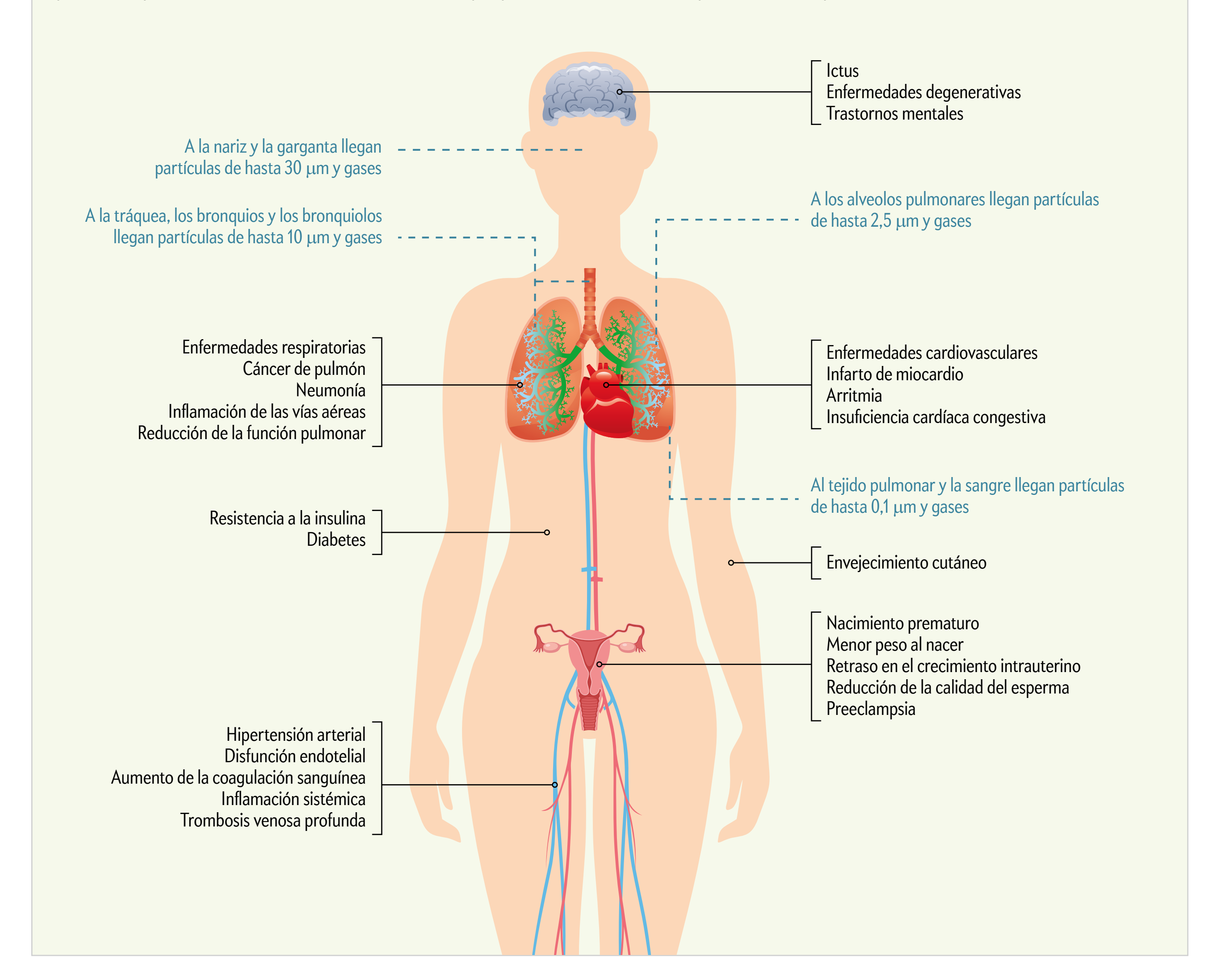
Pero ¿qué se entiende por contaminación atmosférica? Se trata de una mezcla compleja de componentes sólidos (partículas) y gaseosos. En Europa, la originan sobre todo el tráfico motorizado, la industria y las calefacciones domésticas; y, en menor medida, el transporte de envíos, la agricultura y algunos factores naturales, como el polvo procedente del Sáhara y los volcanes.

La combustión es la principal reacción implicada en las actividades humanas que causan contaminación atmosférica. En ella se producen partículas sólidas, óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos orgánicos volátiles. Tales partículas y moléculas pueden ser emitidas mayoritariamente desde su fuente, como el hollín y el NO_2 de los motores de combustión

ENFERMEDADES ASOCIADAS A LA POLUCIÓN

¿Cómo nos afectan los contaminantes?

El aire de las ciudades contiene una mezcla compleja de sustancias y partículas sólidas de diferente tamaño procedentes sobre todo de las emisiones de los automóviles y las calefacciones domésticas. Los pulmones constituyen el principal órgano de destino de todos los contaminantes (las partículas de hasta 10 micrómetros y los gases), pero los de menor tamaño (las partículas de hasta 100 nanómetros y los gases) se incorporan desde ellos a la sangre y se distribuyen por todo el organismo (*azul*). Abajo se detallan los procesos que desencadenan y las enfermedades que provocan en diferentes partes del cuerpo.



diésel, y reciben el nombre de contaminantes primarios; o pueden formarse en la atmósfera a partir de sustancias precursoras, y se denominan contaminantes secundarios. Un ejemplo de contaminante secundario gaseoso es el ozono, que se forma a través de complejas reacciones fotoquímicas de los óxidos de nitrógeno y de compuestos orgánicos volátiles. Un contaminante secundario sólido es el sulfato de amonio, que se forma a partir del gas amoníaco, emitido por abonos agrícolas, y el dióxido de azufre (SO_2), liberado durante la combustión del carbón.

Las partículas sólidas son una mezcla compleja. En función de sus efectos sobre la salud se dividen en partículas inferiores a 10 micrómetros (PM_{10}), inferiores a 2,5 micrómetros ($PM_{2,5}$) e inferiores a 100 nanómetros, denominadas partículas ultrafinas. Cuanto más pequeño es su tamaño, mayor es la profundidad a la que se depositan en los pulmones y en el torrente sanguíneo.

Desgraciadamente, en contraste con otras enfermedades, como las infecciosas, en las que pueden detectarse virus o bacterias en el cuerpo, no existen marcadores específicos que puedan medirse con facilidad en el organismo humano para determinar si una dolencia concreta es consecuencia de la contaminación atmosférica. Por este motivo, las pruebas actuales proceden de estudios en los que se comparan los índices de enfermedad entre grupos de personas expuestas a distintos niveles de contaminantes. Se trata de un enfoque estadístico en el que también se tienen en cuenta otros factores, como la edad, el sexo, el hábito tabáquico y el estatus socioeconómico. Ya se han llevado a cabo miles de tales estudios en todo el mundo, lo que está propor-

cionando una sólida base de datos acerca de los efectos de la polución del aire en la salud.

Los principales procesos que producen los contaminantes son la inflamación sistémica y el estrés oxidativo, los cuales dan lugar a una amplia gama de efectos corporales, como la coagulación de la sangre. Estos conllevan una gran cantidad de enfermedades y, en última instancia, pueden desembocar en la muerte. Además, pueden alterar el funcionamiento del sistema nervioso autónomo (el responsable de las funciones involuntarias de los órganos internos) o provocar daños por intrusión directa de las partículas en el torrente sanguíneo e incluso en el interior de órganos específicos.

Entre los principales trastornos que provoca o favorece la contaminación cabe mencionar las enfermedades respiratorias, el cáncer de pulmón, la neumonía, la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, el infarto de miocardio, la arritmia, el ictus, las enfermedades neurodegenerativas, el parto prematuro y el retraso en el desarrollo fetal.

Asimismo, nuestro grupo ha comprobado el modo en que afecta a la salud mental. En un estudio llevado a cabo en Barcelona en 2015 demostramos que provocaba retrasos en el desarrollo cognitivo de los escolares; los niños de las escuelas donde había unos niveles más altos de contaminantes tuvieron un rendimiento entre el 5 y el 6 por ciento inferior al de los niños en escuelas con menor contaminación. De hecho, un estudio de China halló que el efecto de esta equivalía a perder dos años de escolaridad. Otras investigaciones han indicado que la polución puede acelerar el deterioro cognitivo en los ancianos, o incluso contribuir a la epidemia de obesidad.

MÍNIMOS Y MÁXIMOS PERJUDICIALES

La mayoría de los estudios que analizan los efectos en la salud se han llevado a cabo en Europa y en América del Norte, donde los niveles de contaminantes son entre bajos y medios. La existencia desde hace años de legislación al respecto ha conseguido mantenerlos a raya en dichas zonas. Pero una pregunta que sigue sin respuesta es si los contaminantes provocan también efectos adversos a concentraciones muy bajas. Para las $PM_{2,5}$, las directrices de la Unión Europea establecen un valor medio anual máximo de 25 microgramos por metro cúbico de aire ($\mu g/m^3$). Estas normas tienen en cuenta una gran variedad de factores, entre los que se incluyen los intereses económicos. En cambio, las directrices de la Organización Mundial de la Salud, que se basan puramente en las pruebas existentes acerca de la toxicidad de los contaminantes, fijan ese valor en 10 $\mu g/m^3$, una cifra que suele ser superada en la mayoría de las ciudades europeas, con valores medios de entre 10 y 40 $\mu g/m^3$. En Barcelona, por ejemplo, se alcanza un valor medio anual de 17 $\mu g/m^3$.

Estudiar los efectos de las concentraciones bajas de contaminantes reviste una enorme dificultad: se necesita una gran cantidad de participantes en los estudios, una evaluación cuidadosa de los niveles de contaminación atmosférica y una valoración minuciosa de otros factores, los denominados factores de confusión, que pueden influir también en los efectos que se desean evaluar, como la edad, el hábito tabáquico y el estatus socioeconómico de los participantes.

Algunos estudios han demostrado efectos perjudiciales de niveles muy reducidos de contaminantes, inferiores a los 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2,5}$. En la actualidad, se están llevando a cabo amplios ensayos en Europa, como el proyecto ELAPSE, para evaluar la toxicidad de contaminantes en cantidad muy reducida. Los resultados no estarán disponibles hasta finales de este año o hasta 2020, pero podrían influir enormemente en la futura legislación y en la aplicación de medidas inmediatas y drásticas.

En el extremo opuesto se halla la situación en la que la contaminación supera con creces el máximo permitido en las legislaciones vigentes. Durante largo tiempo, los estudios en países con niveles de contaminantes muy altos, como India y China, donde las $PM_{2,5}$ pueden superar el centenar de microgramos por metro cúbico de aire, han resultado escasos.

Esa falta de datos representaba una laguna importante en el conocimiento. Se suponía que las relaciones entre la contaminación atmosférica y los efectos sobre la salud se estabilizaban en el extremo superior de la escala de contaminación. Dicho de otro modo, que, a partir de cierto valor, las repercusiones para la salud serían más o menos las mismas. Sin embargo, estudios epidemiológicos recientes, como el publicado por Aaron J. Cohen, del Instituto de Efectos en la Salud, en Boston, y sus colaboradores, han demostrado lo contrario: los efectos en el extremo superior siguen creciendo, lo que significa que el impacto real sobre la salud en los países incumbidos podría ser mucho más grave de lo que se había estimado. Por suerte, en los últimos años la contaminación atmosférica ha atraído mucha atención en China, sobre todo debido a la frecuencia de los episodios graves, por lo que existen ahora más fondos disponibles para estudiar esas cuestiones y para introducir intervenciones que reduzcan los contaminantes.

EL EXPOSOMA

Una de las últimas tendencias en la investigación sobre los efectos de la polución en la salud es la investigación del exposoma. Este se define como la totalidad de las exposiciones ambientales, incluida la contaminación atmosférica, a las que están sometidas las personas a lo largo de su vida. Se trata de un nuevo paradigma que contempla el empleo de las nuevas técnicas *ómicas*: la transcriptómica, que mide el conjunto de moléculas de ARN transcritas presentes en un tejido u órgano; la proteómica, que hace lo propio con el conjunto de proteínas; la metabolómica, que examina el conjunto de metabolitos; y el análisis de la metilación del ADN, el conjunto de grupos metilo unidos a la molécula de ADN y que forman parte de lo que se conoce como epigenoma.

Todas esas técnicas permiten identificar marcadores moleculares que pueden relacionarse con alteraciones asociadas a la contaminación, como la activación de ciertas vías biológicas (entre ellas, la inflamación) o la presencia de marcadores precoces de enfermedad. Tal información puede extraerse gracias a que dichas técnicas generan un número ingente de datos. La transcriptómica permite detectar la expresión de más de 35.000 genes (o transcritos de ARN), mientras que, mediante el empleo de un panel de metilación de referencia, pueden analizarse cerca de 400.000 cambios en el epigenoma.

Varios proyectos europeos en los que participa nuestro equipo de ISGlobal, como Helix y EXPOsOMICS, han empezado a explorar el efecto de la contaminación atmosférica en los marcadores ómicos. El éxito es desigual, sobre todo porque a menudo los resultados obtenidos en un estudio no han concordado con los alcanzados en otro. A ello ha contribuido la dificultad de estudiar poblaciones extensas. Los efectos esperados en los marcadores ómicos son relativamente pequeños, y para detectar cualquier alteración en ellos se necesita un tamaño de población grande, porque los análisis estadísticos conllevan múltiples cálculos de una gran cantidad de datos. Pero la aplicación de las técnicas ómicas sigue resultando cara, por lo que todavía



LOS TUBOS DE DIFUSIÓN son dispositivos sencillos y de bajo coste que sirven para medir algunos gases, como el dióxido de nitrógeno. Con la colaboración de los ciudadanos, que se ocupan de instalarlos, permiten conocer cómo varía la contaminación en diferentes barrios y zonas.

no es factible utilizarla en centenares de miles de personas. Sin embargo, los precios están bajando con rapidez y, además, es posible que dichas técnicas se introduzcan pronto en las pruebas de salud rutinarias. Ambos avances ofrecerán sin duda la oportunidad de llevar a cabo estudios a gran escala y prevenir la enfermedad en estadios precoces.

¿ES RECOMENDABLE EL EJERCICIO EN LAS CIUDADES?

El interés por desplazarse en bicicleta ha crecido en numerosas urbes europeas, en muchas de las cuales ha aumentado el uso de este vehículo. Es un dato positivo, puesto que la actividad física resulta muy importante para la salud y el bienestar de las personas.

De hecho, la falta de actividad provoca varias enfermedades, entre ellas el cáncer, y un aumento de la mortalidad prematura. En todo el mundo, más de 3 millones de personas fallecen de forma prematura como consecuencia de llevar una vida extraordinariamente sedentaria. Ir en bicicleta al trabajo o a la escuela, como parte de la rutina cotidiana, es una buena forma de introducir la práctica regular de ejercicio. No obstante, el esfuerzo que ello conlleva hace duplicar o triplicar el ritmo de la respiración, por lo que a muchos ciclistas les preocupa que inhalar una mayor cantidad de aire contaminado perjudique su salud; más si se tiene en cuenta que en las calles con mucho tráfico motorizado los niveles de contaminantes pueden ser dos o tres veces superiores a los de calles situadas solo a unos 50 o 100 metros de distancia.

Por fortuna, un gran número de estudios de modelización han demostrado que los beneficios para la salud derivados de ir en bicicleta superan ampliamente los riesgos asociados a la mayor inhalación de contaminantes (y, de hecho, también a los accidentes). Los ciclistas quizás inhalen cerca de un 10 por ciento más contaminantes que los peatones, pero el riesgo extra sobre la salud provocado por esta circunstancia es bastante pequeño, en comparación con los beneficios que proporciona la actividad física adicional.

Sin embargo, varios estudios recientes indican que en áreas muy contaminadas los ciudadanos tal vez no alcancen esos beneficios, especialmente los más vulnerables. Así, un estudio de 2018 liderado por Rudy Sinharay, del Colegio Imperial de Londres, comparó diversos efectos sobre la salud en dos grupos de personas que padecían alguna enfermedad pulmonar o cardíaca crónica. Ambos grupos caminaron durante dos horas por Londres, uno en Hyde Park, donde los valores de contaminantes son relativamente bajos, y otro en Oxford Street, donde son elevados a causa del intenso tráfico de autobuses y taxis con motor diésel. Mientras que el grupo de Hyde Park experimentó una mejora en la elasticidad de las arterias, el de Oxford Street no mostró ninguna ventaja. Otro estudio realizado en tres ciudades europeas (Barcelona, Londres y Amberes) observó que la actividad física mejoraba la función pulmonar en áreas con baja contaminación, pero no en aquellas donde era elevada.

Sin duda, estos datos suscitan cierta preocupación entre los atletas de alto rendimiento. Durante la celebración de las Olimpiadas de Pekín se cerraron muchas fábricas para reducir la contaminación en la ciudad. Es difícil saber si ello tuvo algún efecto sobre los atletas, pero sí se detectaron beneficios sobre la salud en la población pekinesa tales como una reducción de la inflamación sistémica, del estrés oxidativo y de la mortalidad cardiovascular, así como una mejora de la función pulmonar. Como precaución, es recomendable hacer ejercicio lejos de calles muy transitadas y de otras fuentes de contaminación atmosférica, a fin de evitar una exposición excesiva a las sustancias tóxicas y obtener los máximos beneficios de la actividad física.

CIENCIA CIUDADANA CONTRA LA CONTAMINACIÓN

Numerosas ciudades de todo el mundo (a excepción del continente africano) poseen estaciones de medición de la contaminación atmosférica, que, de forma regular (normalmente cada hora), miden varios de los contaminantes denominados «criterio», como PM_{10}, $PM_{2,5}$, NO_2 y CO. Los datos se recopilan con fines regulatorios. Estas estaciones entrañan un elevado coste (entre 100.000 y 150.000 euros al año), y el número de las que se colocan en una ciudad depende del tamaño de esta y de su presupuesto: desde una o dos hasta decenas de ellas. Sin embargo, los niveles de contaminación varían mucho en una ciudad, tanto en el tiempo como en el espacio. Además, las estaciones tienden a estar situadas en ubicaciones de fondo (lejos de las calles), por lo que no capturan la variación completa de los niveles de contaminantes. La participación de los ciudadanos puede ofrecer ayuda en este sentido, por la posibilidad de recopilar un gran número de datos en diferentes barrios y zonas.

Los habitantes de las urbes se han ido preocupando cada vez más por los niveles de contaminantes cerca de su hogar o en su trayecto al trabajo. Esto ha dado lugar a distintos proyectos de ciencia ciudadana, como hackAIR, CITI-SENSE y Cities-Health (los dos últimos coordinados en España por nuestro equipo de ISGlobal), en los que se han intentado fabricar o implementar sensores de partículas sólidas y gases. Además, varios fabricantes han diseñado sensores de bajo coste (de unos centenares de euros) que pueden comprarse fácilmente (Pumple air, Plantower,

XAIRE

Bettair). Ha habido ciertas dudas acerca de la precisión y la fiabilidad de dichos sensores, pero están mejorando con rapidez.

Unos de los sensores más sencillos y fiables son los tubos de difusión pasiva, o tubos de Palmes. Se utilizan para medir la concentración de gases como el NO_2. Cuestan entre 5 y 10 euros, y pueden utilizarse durante un período de tiempo corto (entre una y dos semanas), si bien son de un solo uso.

La disponibilidad y la implementación de estos sensores han mejorado en gran medida el conocimiento y la concienciación sobre la contaminación atmosférica, y han hecho que esta ganara importancia en la agenda política. Un ejemplo lo ofrece el proyecto reciente de ciencia ciudadana xAIRE, coordinado por Josep Perelló, de la Universidad de Barcelona. En él participaron 20 escuelas de Barcelona, a cada una de las cuales se entregó 40 tubos de difusión de NO_2 que los alumnos debían colocar por todo el centro para medir el contaminante a lo largo de una semana.

Una iniciativa ciudadana en Bélgica denominada Curieuze Neuzen («Narices curiosas»), que se puso en marcha primero en Amberes y después en toda Flandes, trabajó con un periódico nacional para aumentar la concienciación sobre la contaminación. En Amberes, una autopista muy concurrida divide la ciudad en dos, y sus habitantes han llevado a cabo una intensa campaña para que se sotierre la vía y se construya un parque encima. Los participantes colocaron 2000 tubos de difusión de NO_2 por toda la ciudad para demostrar el impacto de la carretera. En el conjunto de Flandes, se distribuyeron un total de 20.000, y se consiguió aumentar la concienciación de la población y cambiar la agenda política. La iniciativa ha sido recogida por la Agencia Europea de Medio Ambiente, la cual está trabajando ahora con muchos países europeos, incluida España, para poner en marcha proyectos similares.

CÓMO REDUCIR LA CONTAMINACIÓN

Dados los efectos de la polución sobre la salud y la elevada carga que acarrea en los sistemas sanitarios, es importante reducir sus valores actuales. Una de las formas más eficaces de hacerlo consiste en eliminar o reducir la emisión de contaminantes desde su origen, principalmente los generados por el tráfico motorizado, la calefacción de los hogares o la industria.

Me centraré aquí en el tráfico motorizado. En Europa, la regulación de las emisiones de los vehículos, que se puso en marcha en 1992 con las Normas Euro, ha dado lugar a una disminución de los índices de contaminación. Desgraciadamente, las normas se basaron en las emisiones de los vehículos medidas en el laboratorio y no tuvieron suficientemente en cuenta las condiciones reales de conducción y mantenimiento del automóvil. Como consecuencia, durante la conducción normal se producen más contaminantes de los que los fabricantes suelen especificar para sus vehículos. Además, el control de las emisiones de los tubos de escape, si bien resulta positivo para mantener a raya los óxidos de nitrógeno, solo recoge la mitad de todas las partículas sólidas que contaminan el aire; el resto procede del desgaste de los frenos y las ruedas. Los nuevos protocolos de análisis de las emisiones que se vayan introduciendo a lo largo de los próximos años deberían abordar estos problemas.

Varias ciudades han introducido zonas de baja emisión, en las que solo se permite la entrada a los vehículos con determinadas especificaciones. Pero esa estrategia ha tenido un éxito desigual, y en general no se ha observado una disminución importante en los niveles de contaminantes. En algunas urbes también se han fijado impuestos de congestión y los conductores deben pagar para acceder a una parte de la ciudad. Si bien este sistema ha servido para llenar algo las arcas del ayuntamiento, ha resultado mucho menos eficaz a la hora de reducir la contaminación. Otras ciudades han ido un paso más allá y han establecido barrios sin coches, como el área Vauban de Friburgo, en Alemania. Y otras se han comprometido a prohibir su circulación en toda la ciudad, como es el caso de Hamburgo, que se ha fijado dicha meta para el 2034. Tal medida puede antojarse algo drástica, pero podría aplicarse en el futuro en barrios de numerosas ciudades, dado que muchas de ellas no solo quieren solucionar sus problemas de contaminación, sino también abordar otros aspectos, como la habitabilidad, la salud y el cambio climático.

La transición energética de los combustibles fósiles a las energías renovables (como la solar, la hidráulica y la eólica) no solo hace frente a los problemas relacionados con el cambio climático, sino también a los de contaminación atmosférica, y podría aportar grandes beneficios para la salud. La reducción o la eliminación en la vida cotidiana del uso del carbón, la madera, el petróleo y el gas asociado al transporte, las calefacciones domésticas y la industria exigirá grandes compromisos e inversiones, pero abre muchas oportunidades para un futuro mejor, más sostenible y saludable. Los intereses creados, como los de los fabricantes de automóviles, pueden dificultar dicha transición, pero es necesario enfrentarse a los efectos actuales del cambio climático, que pueden conllevar un coste mucho más alto si no se abordan ahora.

Y una última reflexión. La mayoría de la población europea vive hoy en ciudades, y es necesario analizar cómo las diseñamos o las rediseñamos para reducir la actual dependencia del coche. La expansión urbana y las deficiencias en el transporte público y los carriles bici han dado lugar, en numerosas urbes, a una gran dependencia del coche y a la congestión. Se necesitan mayores inversiones en infraestructuras de transporte público para reducir el uso de coches y motos y proporcionar a los ciudadanos un entorno más habitable y saludable.

PARA SABER MÁS

Association between traffic-related air pollution in schools and cognitive development in primary school children: A prospective cohort study. Jordi Sunyer et al. en *PLOS Medicine*, vol. 12 n.º 3, e1001792, marzo de 2015.
Urban and transport planning, environmental exposures and health-new concepts, methods and tools to improve health in cities. Mark J. Nieuwenhuijsen en *Environmental Health*, vol. 15, n.º 1, pág. 38, marzo de 2016.
Car free cities: Pathway to healthy urban living. Mark J. Nieuwenhuijsen y Haneen Khreis en *Environment International*, vol. 94, págs. 251-262, septiembre de 2016.
A joint ERS/ATS policy statement: What constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework. George D. Thurston et al. en *European Respiratory Journal*, 49:1600419, abril de 2017.
Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study. Aaron J. Cohen et al. en *The Lancet*, vol. 389, págs. 1907-1918, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Alteraciones genéticas inducidas por la contaminación. Dan Fagin en *IyC*, octubre de 2008.
Calidad del aire urbano. Xavier Querol, Fulvio Amato y Andrés Alastuey en *IyC*, junio de 2010.
Mejor en bicicleta o a pie. Audrey De Nazelle en *IyC*, noviembre de 2011.
Exposición prenatal a contaminantes y salud infantil. Mireia Gascón Merlos en *IyC*, diciembre de 2014.

por François Savatier

Insectos palo que se hacen notar

Los machos de ciertas especies exhiben vistosos colores y un gran tamaño, un hecho inusual en este grupo

Los fásmidos, o insectos palo, cuyo aspecto recuerda a una ramita, un tallo espinoso o una corteza, son a todas luces unos campeones del camuflaje. Pero el equipo de Frank Glaw, de la Colección Estatal Zoológica de Múnich, ha descrito ahora dos especies nuevas halladas en Madagascar, *Achrioptera manga* y *Achrioptera maroloko*, ninguna de las cuales pasa inadvertida. Ambas miden más de 20 centímetros de largo, lo que las sitúa entre los insectos de mayor tamaño y, además, el macho, lejos de camuflarse, luce vivos colores.

El macho de estos dos insectos insólitos (cuyo género, *Achrioptera*, engloba a una docena de especies, todas ellas africanas) no recurre en absoluto al camuflaje: *A. manga* es de un color azul intenso y una parte de sus patas son amarillas (*imagen inferior*), mientras que *A. maroloko* llama la atención por su cuerpo amarillo provisto de alas negras (*página siguiente*). Pero, entonces, ¿cómo escapan de las aves y otros insectívoros?

Glaw propone una explicación evolutiva. Al igual que ocurre, por ejemplo, con ciertas ranas sudamericanas, los brillantes colores de los machos de estas dos especies de fásmidos podrían transmitir el mensaje «¡cuidado, soy muy tóxico!», un fenómeno que se conoce como aposematismo. Una posibilidad es que los linajes de *A. manga* y *A. maroloko* evolucionaron de tal forma que los machos habrían adquirido, poco a poco, inmunidad frente al veneno de las plantas que consumían, y estas toxinas serían, a su vez, responsables de su coloración. Las hembras de estas dos especies, que, por el contrario, siguen siendo de un color críptico que les permite camuflarse, podrían haber seleccionado esta peculiar defensa antidepredadora eligiendo aparearse, de forma sistemática, con machos vistosos.

—François Savatier es periodista científico de Pour la Science*, edición francesa de* Scientific American.



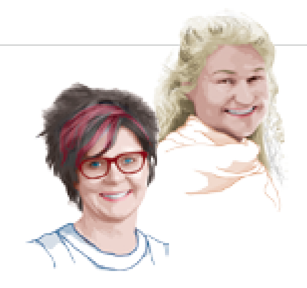


Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

por Brigitte van Tiggelen y Annette Lykkness

Brigitte van Tiggelen es historiadora de la química y directora para Europa del Instituto de Ciencia e Historia de Filadelfia.

Annette Lykkness es profesora de didáctica de la química e historiadora de la química en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, en Trondheim. Han coordinado *Women in their element: Selected women's contributions to the periodic system* (publicado este mes por World Scientific).



Las mujeres de la tabla periódica

Un homenaje a las investigadoras que contribuyeron al descubrimiento de los elementos químicos y sus propiedades

La historia de la clasificación de docenas de elementos en una tabla periódica no se ciñe a una persona ni a un momento en el tiempo. Los científicos habían clasificado y predicho la existencia de los elementos antes de que Dimitri Mendeléiev propusiera su esquema en 1869, y siguieron haciéndolo después. Fueron muchos los que trabajaron para descubrir y explicar el comportamiento de las nuevas sustancias. Los gases nobles, la radiactividad, los isótopos, las partículas subatómicas y la mecánica cuántica todavía no se habían descubierto a mediados del siglo xix.

Para celebrar el Año Internacional de la Tabla Periódica, dedicamos este artículo a algunas de las mujeres que revolucionaron nuestra concepción de los elementos. Marie Curie es la más famosa, por sus investigaciones sobre la radiactividad y el descubrimiento del radio y el polonio, que le valieron el Nobel en dos ocasiones. La mayoría, sin embargo, son poco conocidas. Tampoco suele apreciarse la tenacidad y diligencia que requiere el trabajo experimental, la valoración de datos y la reconsideración de las teorías vigentes.

Demostrar la existencia de un nuevo elemento no es tarea fácil. El primer paso consiste en detectar una actividad inusual; un comportamiento químico o una propiedad física (las emisiones radiactivas y las líneas espectrales, por ejemplo), que no se corresponda con la de ningún elemento conocido. Luego hay que aislar el nuevo elemento, o un compuesto de él, en cantidades lo suficientemente grandes como para poder pesarlo y convencer a la comunidad científica.

Descubrir y ordenar

Marie Curie no andaba a la búsqueda de nuevos elementos cuando inició su tesis doctoral sobre los «rayos del uranio», en 1897. Quería explorar la radiactividad, un fenómeno descubierto por Henri Becquerel en 1896. Pero sospechó de la existencia de otros elementos al observar que la radiactividad de la pechblenda, un mineral de uranio, era superior a la que cabía esperar de su contenido en uranio. Su marido Pierre se incorporó entonces a las investigaciones.

En 1898 identificaron las líneas espectrales de dos nuevos elementos: el radio y el polonio. Sin embargo, les llevó más de tres años pulverizar, disolver, hervir, filtrar y cristalizar toneladas de pechblenda para extraer tan solo 0,1 gramos de un compuesto de radio. La extracción del polonio sería aún más difícil, porque su vida media es más breve. En 1903, Pierre y Marie Curie compartieron el premio Nobel de física con Henri Becquerel por el descubrimiento de la radiactividad, y en 1911 Marie recibió un segundo Nobel por el descubrimiento del radio y el polonio y por la concentración y el estudio del radio.

Ubicar un elemento en la tabla periódica requiere establecer su peso atómico y sus propiedades químicas. El radio, por ejemplo, se comporta de modo muy similar al bario, pero su peso atómico es mayor, así que se sitúa justo debajo del bario. Determinar el peso atómico es difícil porque exige disponer de sustancias puras.

Cuesta distinguir elementos de peso y carácter similares. Poco después de elaborar su tabla, Mendeléiev propuso a la química rusa Julia Lermontova refinar los procesos de separación de los metales del grupo del platino (rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino), como paso previo a su ordenación. Solo sabemos de su trabajo a través del archivo y la correspondencia de Mendeléiev. Lermontova estudió química en Heidelberg con Robert Bunsen (descubridor del cesio y el rubidio en 1860, junto con Gustav Kirchhoff, con el espectroscopio que acababan de inventar), y fue la primera mujer que obtuvo un doctorado en química en Alemania, en 1874.

Establecer el peso atómico era, asimismo, crucial para identificar las series de desintegración radiactivas y distinguir entre nuevos elementos y las variedades de elementos conocidos. El concepto de isótopo solucionó el problema planteado por el descubrimiento de numerosos elementos para los que en apariencia no había espacio en la tabla periódica. Aunque el químico británico Frederick Soddy introdujo el concepto en 1913, fue la médica Margaret Todd quien propuso el término, que en griego significa «el mismo lugar».

La química polaco-judía Stefanie Horovitz, del Instituto de Radio de Viena, aportó la prueba experimental de la existencia de isótopos. Un elemento tan común como el plomo presentaba distintos pesos atómicos, según si procedía de la desintegración radiactiva del uranio o de la del torio.

También era problemática la naturaleza de una curiosa «emanación» del radio. ¿Era una partícula o un gas? La física canadiense Harriet Brook resolvió el problema junto con su director de tesis, Ernest Rutherford, en la Universidad McGill de Montreal. En 1901, Brooks y Rutherford mostraron que la emanación se difundía como un gas pesado y aportaron la primera prueba de que la desintegración radiactiva producía nuevos elementos. En 1907, William Ramsay sugirió que el gas, al que se denominaría radón, pertenecía al «grupo de los elementos del helio», que hoy conocemos como gases nobles.

En 1902, Rutherford y Soddy anunciaron su teoría de la desintegración radiactiva, según la cual los átomos se transmutan espontáneamente en nuevos átomos con la emisión de radiación. Si bien Rutherford obtuvo el Nobel de quí-


LA QUÍMICA ALEMANA IDA NODDACK, que abandonó un puesto en la industria para investigar los elementos, participó en el descubrimiento del renio.

ARCHIVOS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LOVAINA

mica de 1908 por estas investigaciones, la crucial contribución inicial de Brooks apenas ha sido reconocida. Tras publicar conjuntamente un primer artículo, el siguiente, en *Nature*, lo firmó Rutherford, que se limitó a indicar en los créditos la asistencia de Brooks. Como mujer de ciencia, Brooks tuvo dificultades, especialmente tras casarse, para obtener puestos estables y desarrollar sus investigaciones.

Al fondo de la materia

A todo esto, no dejaban de producirse avances en la comprensión del núcleo atómico. En 1918, la física Lise Meitner y el químico Otto Hahn descubrieron en Berlín el elemento 91, el protactinio. Meitner era austríaca y, tras completar su doctorado, había buscado en Alemania una oportunidad profesional. En 1907 fue admitida como colaboradora no remunerada de Hahn en el departamento de química de la Universidad de Berlín. Tuvo que trabajar en el sótano porque las mujeres no podían acceder al edificio principal. En 1913, cuando Hahn se incorporó al Instituto Emperador Guillermo de Química en Berlín-Dahlem, Meitner fue nombrada «asociada» del instituto.

Hahn y Meitner descubrieron el protactinio en el curso de una investigación sobre la «sustancia madre» de la serie de desintegración del actinio. Otros científicos perseguían el mismo objetivo e, inevitablemente, se produjeron disputas de prioridad. El descubrimiento fue atribuido a Meitner y Hahn porque concentraron el nuevo elemento en mayor cantidad y lo caracterizaron de forma más completa que sus competidores.

También el renio (elemento número 75) fue descubierto conjuntamente en 1925 en Berlín por la química alemana Ida Noddack y su marido, el también químico Walter Noddack, junto con Otto Berg, de la empresa de ingeniería eléctrica Siemens–Halske. Ida Tacke, que adoptaría el apellido de su marido, dejó un puesto en la industria química para ir a la caza de elementos. En 1925 se incorporó en calidad de investigadora no remunerada al Instituto Físico-Técnico Imperial de Berlín, donde Walter Noddack dirigía el departamento de química. Los Noddack tuvieron que emplearse a fondo para producir cantidades ponderables de renio, así denominado por el Rin. Es uno de los elementos más raros de la Tierra y no es radiactivo.

Los Noddack reclamaron asimismo el descubrimiento del elemento 43, al que denominaron masurio por la región de Masuria, en Polonia. Pero no consiguieron replicar las líneas espectrales ni aislar la sustancia. Las técnicas de la «química húmeda» no eran apropiadas para la identificación de este elemento, el primero en ser producido artificialmente, en 1937, y que recibiría el nombre de tecnecio.

A diferencia de Marie Curie, cuyas contribuciones fueron reconocidas y que tras la muerte de Pierre ocupó su cátedra en la Universidad de París, Ida Noddack trabajó como invitada en el laboratorio de su marido durante la mayor parte de su carrera. Esta es una de las razones por las que no se tomó en serio su sugerencia, en 1934, de que el núcleo podía partirse, un proceso que hoy denominamos fisión.

Los descubrimientos del neutrón, en 1932, y de la radiactividad artificial, en 1934, abrieron una nueva línea de investigación: la fabricación de elementos en el laboratorio mediante el bombardeo de átomos con partículas. En 1934, el físico Enrico Fermi y sus colaboradores en la Universidad de Roma anunciaron que habían producido los elementos 93 y 94 tras bombardear uranio con neutrones. Ida Noddack señaló en un artículo en *Angewandte Chemie* que Fermi no había demostrado que no se hubieran producido elementos más ligeros. «Es concebible», argumentó, «que el núcleo se haya dividido en varios fragmentos grandes». Los físicos la ignoraron.

Sin embargo, en 1938, Meitner y Hahn demostraron que el bario se encontraba entre los productos de las reacciones estudiadas por Fermi y que el núcleo se había partido. Para entonces, a falta de meses para que estallara la Segunda Guerra Mundial, Meitner, de ascendencia

judía, había huido a Suecia. Pese a que sus cálculos habían convencido a Hahn de la fisión del núcleo, este no la incluyó como coautora al publicar los resultados en 1939, y en 1945 no aprovechó el discurso de aceptación del Nobel de química de 1944 para reconocer el papel de Meitner.

La mayoría de estas pioneras colaboraron con colegas masculinos, y no es fácil distinguir sus contribuciones. La física francesa Marguerite Perey es una excepción: se la considera la única descubridora del elemento 87, el francio, en 1939. Se incorporó al instituto de Marie Curie en París a los 19 años como técnica de laboratorio, bajo la dirección de Irène Joliot-Curie y André Debierne. Ambos le pidieron, independientemente, que midiera con precisión la vida media del actinio 227. En el curso de este delicado procedimiento técnico, identificó el nuevo elemento. Al no ponerse de acuerdo sobre quién dirigía a Perey, ninguno de ellos pudo reclamar un papel en el hallazgo. Perey acabaría dirigiendo el departamento de química nuclear de la Universidad de Estrasburgo, y en 1962 se convirtió en la primera mujer escogida como miembro correspondiente de la Academia de las Ciencias francesa. Pese a que no había ninguna regla que excluyera la elección de mujeres, la Academia no admitiría una mujer como miembro de pleno derecho hasta 1979.

El francio fue el último elemento natural en ser descubierto. Actualmente, el hallazgo de nuevos elementos requiere grandes equipos, aceleradores de partículas e importantes presupuestos [*véase* «Disputas en la tabla periódica», por Edwin Cartlidge; Investigación y Ciencia, mayo de 2019]. El significado de elemento químico ha cambiado. Si para Mendeléiev era una sustancia estable incapaz de transmutarse, hoy incluye especies isotópicas que existen apenas unos milisegundos.

Mediante esas técnicas, la química estadounidense Darleane Hoffman llevó a cabo un avance monumental a principios de los años setenta. Demostró que el fermio 257 se fisionaba espontáneamente, no solo al ser bombardeado con neutrones. También descubrió el plutonio 244 natural. Fue la primera mujer que dirigió una división científica en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México, donde se formaron generaciones de científicas. Una de ellas, Dawn Shaughnessy, es la investigadora principal de un proyecto sobre elementos pesados del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en California, en el marco del cual se han descubierto seis elementos (del número 113 al 118).

Usar los elementos

Muchas otras mujeres han contribuido a ampliar nuestro conocimiento sobre los elementos. Tras el aislamiento del flúor por el químico francés Henri Moissan en 1886, un equipo de mujeres (entre ellas, Carmen Brugger Romaní y Trinidad Salinas Ferrer) trabajó con José Casares Gil en la Universidad de Madrid en los años 1920 y principios de 1930 en el estudio de las propiedades terapéuticas y la presencia en las aguas minerales de este elemento. Cuando tuvieron que dejar las investigaciones como consecuencia de la Guerra Civil (1936-1939), el trabajo de estas mujeres fue incorporado a la bibliografía de Casares.

La química Reatha C. King fue la primera mujer afroamericana que trabajó en la Oficina Nacional de Estándares de los Estados Unidos, en Washington. En los años sesenta estudió la combustión de mezclas gaseosas de flúor, oxígeno e hidrógeno. La alta reactividad del flúor sugería su uso en la propulsión de cohetes. Algunas mezclas eran tan explosivas que requerían técnicas y aparatos especiales, que King diseñó y fueron adoptadas por la NASA.

En la década de 1910, la médica estadounidense Alice Hamilton demostró la toxicidad del plomo y los riesgos que entrañaba para la población y los trabajadores de la industria metalúrgica. Su trabajo obligó a las compañías de seguros y a las empresas a adoptar medidas de protección y compensar a los damnificados. También organizó acciones sociales para que se reconocieran las enfermedades laborales relacionadas con otros metales pesados, como el mercurio. En 1919 se convirtió en la primera profesora nombrada por la Universidad Harvard. Ya en 1925 se pronunció contra la adición de plomo a la gasolina.

La técnica japonesa-estadounidense Toshiko «Tosh» Mayeda era en los años 1950 una experta en la medida de los radioisótopos del oxígeno. Había empezado su carrera limpiando los recipientes de vidrio del laboratorio de Harold C. Urey en la Universidad de Chicago, pero pronto se hizo cargo de los espectrómetros de masa. Contribuyó a la medida de la proporción de isótopos de oxígeno en conchas marinas fosilizadas, a fin de deducir la temperatura de los océanos prehistóricos, y extendió el uso de este método a los meteoritos.

Como estadounidense de ascendencia japonesa, Mayeda fue confinada en un campo de internamiento tras el ataque a Pearl Harbor del 7 de diciembre de 1941, y tuvo que hacer frente a la discriminación. Contando solo con un título de graduada en química, sus contribuciones podían haber sido invisibilizadas, como las de tantas técnicas. Afortunadamente, Mayeda recibió el apoyo de sus superiores y su nombre apareció en las publicaciones junto al de doctores y catedráticos.

Ampliar la perspectiva

Como ocurre con los descubrimientos científicos, la recuperación de la historia de todas estas mujeres de ciencia ha sido un trabajo de equipo en el que han participado Gisela Boeck, John Hudson, Claire Murray, Jessica Wade, Mary Mark Ockerbloom, Marelene Rayner-Canham, Geoffrey Rayner-Canham, Xavier Roqué, Matt Shindell e Ignacio Suay-Matallana.

El estudio de las mujeres que han contribuido al desarrollo de la química ofrece una perspectiva más amplia del descubrimiento científico y de las personas que participan en él, desde ayudantes y técnicos no asalariados a líderes de grandes laboratorios. En este año de celebración de la tabla periódica, es esencial reconocer los esfuerzos individuales y colectivos que nos han permitido construirla y siguen dándole forma.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 565, págs. 559-561, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The transuranium people. D. C. Hoffman, A. Ghiorso y G.T. Seaborg. Imperial College Press, 2000.

Trafficking materials and gendered experimental practices. M. Rentetzi. Columbia University Press, 2009.

African American women chemists. J. E. Brown. Oxford University Press, 2012

For better or for worse? Collaborative couples in the sciences. Dirigido por A. Lykknes, D. Opitz y B. Van Tiggelen. Springer, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lise Meitner y el descubrimiento de la fisión nuclear. Ruth Lewin Sime en *IyC*, marzo de 1998.

Curie confidencial. Xavier Roqué en *IyC*, febrero de 2011.

por Kendall Jones y James Watson

Kendall Jones es investigador predoctoral en la Universidad de Queensland. **James Watson** es profesor en la Facultad de Ciencias Ambientales y de la Tierra de la misma universidad.





Los últimos océanos inalterados

Solo el 13 por ciento de los mares se mantiene sin impactos antropogénicos relevantes

El océano cubre algo más del 70 por ciento de nuestro planeta, una superficie superior a los 160 millones de millas cuadradas. Resulta tan vasto que los exploradores llegaron a considerarlo infranqueable. Y cuando nuestros barcos lograron cruzarlo, los naturalistas creyeron imposible agotar sus pesquerías o provocar la extinción de cualquier especie marina. Estaban equivocados.

La pesca comercial se practica en un área cuatro veces mayor que la destinada a la agricultura, y en gran parte de esa extensión se ha vuelto insostenible. Hemos reducido de forma drástica la abundancia del 90 por ciento de las especies tradicionalmente consideradas importantes, y los grandes peces han sido explotados de forma tan intensa que en la práctica han desaparecido de numerosos lugares. La situación ha llegado hasta tal punto que el estudio actual de los arrecifes coralinos, antaño un hábitat importante para muchas especies de peces, puede equipararse al intento por comprender el Serengueti estudiando únicamente las termitas y los saltamontes e ignorando la existencia de los ñus y los leones.

Algunas personas albergan la esperanza de que todavía existan inmensas zonas oceánicas vírgenes, pues los humanos no habitamos el mar de forma permanente y necesitamos barcos especializados para alejarnos de las zonas costeras. Semejante esperanza resulta infundada. Para nuestra investigación hemos empleado datos de alta resolución sobre 15 tipos de impacto antropogénico, incluidos el transporte marítimo, la llegada de sedimentos terrestres y varios métodos de pesca. Los resultados, publicados el pasado verano en *Current Biology*, demuestran que los «océanos naturales» de la Tierra están menguando. Tan solo el 13 por ciento permanecen en estado inalterado, y en las regiones costeras, donde la actividad humana es más intensa, apenas quedan zonas salvajes. De los aproximadamente 21 millones de millas cuadradas de océano inalterado todavía existentes, la mayoría se encuentran en el Ártico, en la Antártida o alrededor de remotas y poco pobladas naciones insulares del Pacífico.

Estos reductos de océano prístino albergan una vida marina sin parangón, grandes depredadores y una enorme diversidad genética. La ausencia de impactos antropogénicos relevantes puede hacerlos muy resistentes ante el aumento de la temperatura del mar y frente al blanqueo del coral, dos fuentes de perturbación que no pueden evitarse si no es mediante un esfuerzo global y coordinado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.



SIJA HONG

En una era de pérdida generalizada de biodiversidad marina, las áreas inalteradas ofrecen una ventana al pasado, mostrándonos cómo era el océano antes de que la sobrepesca y la contaminación causaran estragos. Este tipo de información resulta esencial para la conservación marina, pues si vamos a restaurar las áreas degradadas para devolverlas a su estado original, necesitamos saber hacia dónde dirigirnos.

Pero lo que más nos preocupa es la ausencia de protección de las zonas inalteradas. En esta situación, pueden desaparecer en cualquier momento, a medida que el desarrollo tecnológico permita pescar a mayor profundidad y alcanzar lugares aún más remotos. Como consecuencia de un clima más cálido, incluso lugares antes protegidos por una cubierta perenne de hielo están en la actualidad abiertos a la pesca y al transporte marítimo.

Esta falta de protección deriva en parte de la ausencia de una política ambiental internacional que reconozca los valores únicos del océano salvaje, y no se centre solo en proteger los ecosistemas amenazados y evitar las extinciones. Es una situación equivalente a la de un Gobierno que destinara todo el presupuesto de sanidad a la cirugía cardíaca de emergencia, pero olvidara el desarrollo de una política preventiva destinada a potenciar el ejercicio físico para reducir el riesgo de infarto. Si la biodiversidad marina de la Tierra debe preservarse para siempre, el énfasis de la conservación no debe recaer únicamente en el servicio de urgencias, sino también en la medicina preventiva.

Nuestro artículo publicado en *Current Biology* incluye un ruego. A medida que desarrollemos acuerdos internacionales de conservación, resultará fundamental reconocer los valores únicos del océano salvaje y deberemos fijar objetivos para protegerlos. De no actuar así, las zonas inalteradas desaparecerán para siempre, un extremo que el presidente Lyndon B. Johnson nos urgió a evitar cuando firmó la Ley de las Áreas Salvajes en 1964. «Si las futuras generaciones han de recordarnos con gratitud, y no con desprecio», subrayó, «deberemos legarles algo más que milagros tecnológicos. Deberemos dejarles una visión de cómo fue el mundo en sus inicios».

MONOGRÁFICOS



TEMAS de IyC
Monografías sobre los temas clave que guían el desarrollo de la ciencia
Revista trimestral
Formatos: papel y digital



CUADERNOS de MyC
Monografías sobre los grandes temas de la psicología y las neurociencias
Revista cuatrimestral
Formatos: papel y digital



ESPECIAL
Recopilaciones de nuestros mejores artículos (en PDF) sobre temas de actualidad
Formato: digital

VIENE MAL

EN SÍNTESIS

Los científicos pueden demostrar que es el cambio climático, y no la mera variabilidad natural del clima, lo que intensifica determinados fenómenos meteorológicos extremos a través de factores globales y regionales.

Los factores globales asociados al cambio climático consisten en temperaturas oceánicas y atmosféricas más elevadas, así como en una mayor presencia de vapor de agua en el aire.

Los factores regionales, que además pueden interaccionar con la variabilidad natural, incluyen la expansión de la zona tropical, la presencia de una masa de agua fría en el océano Atlántico y las alteraciones del vórtice polar.



CLIMA

Los últimos desastres naturales demuestran que las tormentas invernales, lluvias torrenciales y olas de calor estivales se intensifican debido al cambio climático

Jennifer Francis

Ilustración de Peter Horvath



Se originó de la forma habitual: como una masa desordenada de nubes sobre el océano Atlántico, cerca de la prominente costa occidental africana y justo al norte del ecuador. La presión atmosférica era baja, como suele ocurrir al final del verano. La variabilidad natural del clima terrestre genera cada año perturbaciones tropicales en esa región, que a veces se transforman en huracanes. Todos los modelos meteorológicos pronosticaron que las nubes se unirían para dar lugar a una tormenta que giraría inofensiva hacia el noroeste y pondría rumbo al centro del Atlántico, lejos de la costa.



Jennifer Francis es científica principal del Centro de Investigación Woods Hole, en Falmouth, Massachusetts. Fue investigadora en la Universidad Rutgers entre 1994 y 2018. Está especializada en el cambio climático del Ártico y su influencia en el resto del planeta.

Y eso es lo que comenzó a hacer la tormenta tropical Florence el 1 de septiembre de 2018. Pero entonces se desvió de forma obstinada hacia el oeste, aparentemente en dirección al Caribe, mientras iba organizándose. Otra alteración preocupante acechaba en las proximidades de Puerto Rico, que aún no se había recuperado de los estragos causados un año antes por el huracán María, y tres grandes ciclones giraban en el Pacífico tropical. El conjunto de tormentas obtenía su energía a partir de unas temperaturas oceánicas excepcionalmente elevadas. Estas llevan subiendo desde la década de los setenta a la par que las atmosféricas, como consecuencia de los gases de efecto invernadero. Y las tormentas se nutren del calor oceánico y del vapor de agua contenido en la atmósfera, igualmente en aumento. Todos estos incrementos constituyen efectos globales del cambio climático.

Sin embargo, una serie de factores enfrentados mantuvieron débil a Florence. Aunque eso parecía una buena noticia, inquietaba a los meteorólogos. Las tormentas más débiles son conducidas con más facilidad por los vientos de baja altura, que en ese momento soplaban de este a oeste, directamente hacia la costa oriental de EE.UU. Bordeaban el margen sur de un enorme anticiclón circular, inusualmente intenso, estancado en medio del océano Atlántico. Los anticiclones se generan de manera natural, pero los datos muestran que se estancan cada vez más a menudo, un síntoma regional de un clima más cálido. Un «anticiclón de bloqueo» similar guio al huracán Sandy en 2012 en su extraño camino del Atlántico a Nueva Jersey.

El 4 de septiembre ocurrió algo inesperado: la débil Florence sobrevoló un punto anormalmente cálido en el centro del Atlántico occidental. Impulsada por el calor, se intensificó enseguida, convirtiéndose en huracán de categoría 4 a una latitud excepcionalmente septentrional. Otro de los efectos regionales de nuestro clima cambiante es la presencia aleatoria de grandes masas de agua caliente en los océanos.

A medida que Florence se agitaba, los modelos predictivos comenzaban a coincidir: todo apuntaba a que se estancaría al alcanzar la costa de Carolina del Norte y del Sur, donde podría provocar intensas inundaciones, como había hecho el huracán Harvey en Houston un año antes. Y en efecto, Florence golpeó ambos estados el 14 de septiembre y permaneció allí durante cuatro días: los vientos de baja altura eran ahora demasiado débiles para desplazar el sistema. Florence descargó más de 75 cm de agua en algunos lugares y causó la muerte de 50 personas y millones de animales (sobre todo pollos), lo cual generó pérdidas por 20.000 millones de dólares. Las inundaciones atravesaron granjas industriales, minas y depuradoras de aguas residuales y contaminaron ríos y estuarios durante semanas.

La ira de Florence permanecerá en la memoria, al igual que la palpable demostración de las consecuencias del cambio climático. La extraordinaria severidad del huracán puede atribuirse a una serie de efectos del cambio climático: una atmósfera y un océano más calientes, una mayor cantidad de vapor de agua, el persistente anticiclón de bloqueo y unos vientos conductores débiles. Estos factores actúan en todo el planeta, propiciando la rápida intensificación de las tormentas, mayores precipitaciones e inundaciones y vientos tormentosos más fuertes.

Florence es solo uno de los fenómenos que en 2018 ejemplificaron los diversos efectos que ejerce el cambio climático en los eventos meteorológicos extremos. Múltiples «ciclones explosivos» (o «ciclones bomba») azotaron el noreste de EE.UU. La entrada de una masa de aire ártico apodada «la bestia del este» dejó Europa congelada. Las intensas olas de calor paralizaron Japón, Escandinavia y Grecia, y las inundaciones causaron daños en Venecia, París y Maryland.

Obviamente, estos desastres han ocurrido desde que hay humanos en la Tierra. Pero cada año es más evidente que la variabilidad natural no puede explicar la presente epidemia de fenómenos meteorológicos extraños. Aunque en el pasado los científicos se cuidaban de no vincular directamente el cambio climático con eventos meteorológicos concretos, hoy afirmamos que, por su culpa, las grandes inundaciones son cada vez más frecuentes; las olas de calor, más tórridas y prolongadas; y los períodos fríos, más persistentes en algunas regiones.

¿Hasta qué punto pueden achacarse estas agitadas condiciones atmosféricas, que en 2018 causaron pérdidas por más de 160.000 millones de dólares en todo el mundo, al cambio climático? Para responder hay que separar el papel de tres amplios factores. El primero es el efecto global de unas temperaturas oceánicas más elevadas y una atmósfera más caliente y con más vapor de agua. El vapor merece más atención de la que recibe: no solo es otro gas de efecto invernadero que atrapa el calor, sino que también lo libera cuando se condensa para formar nubes y fomenta precipitaciones tormentosas.

El segundo factor engloba los efectos regionales, como los persistentes anticiclones de bloqueo, las extensiones de hielo marino que se derrite, una creciente masa de agua fría al sur de Groenlandia, una corriente del Golfo ralentizada y un vórtice polar cada vez más alterado.

Por último, el tercero responde a las complejas interacciones entre las oscilaciones naturales, como El Niño y La Niña, y los factores regionales. Su investigación es puntera, controvertida y





UN INCENDIO se propaga en Kårböle, Suecia, en julio de 2018, avivado por un calor y una sequía inusuales (*1*). En septiembre de 2018, un anticiclón de bloqueo atrapa durante días al huracán Florence en el este de EE.UU., causando inundaciones en ciudades como Lumberton, Carolina del Norte (*2*).

MATS ANDERSSON GETTY IMAGES (1); JOE RAEDLE GETTY IMAGES (2)

fructífera. Hoy comprendemos mejor cómo y por qué el cambio climático amplifica los fenómenos meteorológicos extremos, lo que nos da las claves para saber cómo prepararnos ante amenazas cada vez más frecuentes y serias.

UN VIOLENTO CICLÓN

La atmósfera terrestre es una agitada capa de gases que se calienta y se enfría constantemente: durante el día, las superficies absorben energía solar, que luego irradian por la noche. Un calentamiento irregular genera vientos locales que soplan en todas direcciones. El agua de continentes y océanos no deja de evaporarse, condensarse en la atmósfera y caer en forma de lluvia o nieve.

Sin embargo, dentro de ese caos también hay patrones predecibles controlados por factores como la latitud, la rotación terrestre, las cadenas montañosas y la circulación oceánica. En el Atlántico, los huracanes como Florence se forman en la región tropical oriental y se desplazan hacia el oeste, y en el Pacífico se mueven en el mismo sentido. La corriente en chorro polar sopla de oeste a este alrededor del hemisferio norte, en latitudes cercanas a la frontera entre EE.UU. y Canadá; la corriente análoga del hemisferio sur atraviesa la parte más meridional de América del Sur y África. Más cíclicos son los grandes sistemas de vientos ligados a fluctuaciones de las temperaturas oceánicas, como El Niño y La Niña, dos fenómenos con un período de recurrencia de entre tres y ocho años y que influyen en los vientos y las precipitaciones de todo el planeta. Los datos procedentes de testigos de barro extraídos en distintos puntos del fondo marino demuestran que esos patrones se han mantenido durante cientos de miles de años.

El caos y la regularidad también imperan en los océanos, donde las aguas se calientan, se enfrían y se desplazan en ciclos más largos. La oscilación decenal del Pacífico consiste en una continua alternancia de temperaturas cálidas y frías entre las partes este y oeste del Pacífico septentrional, con fases que duran aproximadamente una década. La circulación meridional de retorno del Atlántico es una lenta corriente de agua superficial cálida y salada que se desplaza hacia el norte en el Atlántico occidental, pierde calor, se sumerge y regresa a la Antártida. El ciclo tarda unos mil años en completarse.

La interacción entre la atmósfera y los océanos introduce una variabilidad natural en el clima: algunos años son más cálidos o fríos en determinadas regiones; otros son más húmedos o secos. Pero los datos de los últimos milenios contenidos en los testigos de barro demuestran que esta variabilidad tiene sus límites: el clima rara vez excede ciertas cotas. Hasta ahora.

A finales del invierno de 2018 viví una de esas excepciones en primera persona. Siempre se espera que la llegada de marzo sea estruendosa, pero lo de aquel año fue excesivo. La madre naturaleza nos regaló un desfile de potentes tormentas que azotaron la costa este de EE.UU. con vientos procedentes del noreste. Los tres factores mencionados asociados al cambio climático (el aumento global de calor y vapor, los efectos regionales y la interacción entre estos efectos y la variabilidad natural) impulsan estas tormentas.

Yo seguía con inquietud los últimos modelos, que mostraban una ondulación —aparentemente inocua— de la corriente en chorro en el norte del Pacífico y coincidían en que llegaría a la costa este y generaría una tormenta descomunal, que se dirigiría hacia mi ciudad, en la costa sur de Massachusetts. Los modelos se empeñaban en pronosticar la rápida formación de una ventisca —técnicamente, un ciclón explosivo— que descargaría su nieve justamente en mi barrio. Se trataría del tercer gran ciclón de la temporada, algo poco habitual.

Todos los ingredientes estaban a punto: había aire frío atrapado sobre los estados del este (un factor natural); las temperaturas oceánicas más cálidas (un factor global) aportaban energía y humedad más que de sobra para que se gestase una tormenta, y la temperatura del agua en las costas de Nueva Inglaterra era mucho más alta de lo normal (un factor regional).

La interacción entre los factores naturales y regionales era otro elemento importante. A finales de 2013, la oscilación decenal del Pacífico pasó de su fase negativa a la positiva, como parte de su ciclo natural. El cambio elevó la temperatura del mar por encima de la media a lo largo de la costa occidental norteamericana. El calor adicional que esa masa de agua caliente transfiere a la atmósfera ayuda a que la corriente en chorro se ondule hacia el norte en el oeste de América del Norte, formando una «cresta» que puede extenderse hasta Alaska.

Es entonces cuando entra en juego la interacción con un efecto regional. Las temperaturas atmosféricas del Ártico han aumentado entre dos y tres veces más rápido que las del resto del planeta, especialmente en invierno, debido principalmente a la pérdida del 75 por ciento del volumen de hielo marino ártico en solo 40 años. La cresta del Pacífico puede aprovechar ese calor adicional para intensificarse y estancarse durante un tiempo prolongado, propiciando largos períodos de sequía y olas de calor como los que dieron lugar a los recientes y graves incendios de la costa oeste de EE.UU.

Una cresta pronunciada suele venir acompañada de una acusada curva hacia el sur (un «valle»), que en este caso se sitúa sobre la región oriental de Norteamérica y permite que aire

Exacerbar la tormenta

El 2 de marzo de 2018, el ciclón Riley azotó el noreste de EE.UU. y dejó a su paso nueve víctimas mortales y multitud de comunidades sepultadas bajo la nieve o anegadas por las lluvias torrenciales y el violento oleaje. Los hogares de más de dos millones de personas, incluido el mío, se quedaron sin electricidad. La variabilidad natural del clima aportó algunos ingredientes de esta tormenta, pero los efectos globales y regionales del cambio climático se encargaron de intensificarla.

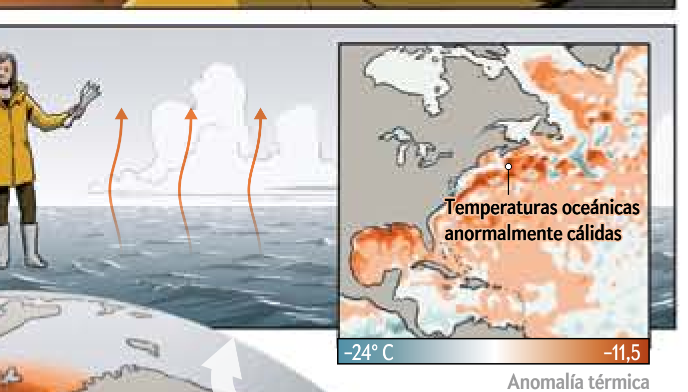
El ciclón comienza el 27 de febrero, como una perturbación atmosférica sobre el oeste de EE.UU. que se desplaza hacia la costa atlántica.

Una gran masa de aire frío atrapada sobre los estados del este (variabilidad natural) brinda las condiciones necesarias para que se desarrolle una tormenta invernal en la costa.

–40° C 0 –1
Temperatura

Las elevadas temperaturas del océano Atlántico (un efecto global del cambio climático) aportan energía y humedad a la tormenta.

Las temperaturas del Atlántico en la costa de Nueva Inglaterra son mucho más altas de lo normal (un factor regional del cambio climático).



Sobre el oeste de Norteamérica, la corriente en chorro se ondula hacia el norte (formando una cresta) y se adentra en Alaska, impulsada por unas temperaturas anormalmente cálidas en las aguas del Pacífico, asociadas a un ciclo decenal (variabilidad natural). Las temperaturas del Ártico son excepcionalmente altas (efecto regional).

–21° C –11
Anomalía térmica

Las altas temperaturas atmosféricas del Ártico (efecto regional) contribuyen a acentuar la cresta y a que perdure la configuración de la corriente en chorro.

Temperaturas oceánicas superficiales altas

OCÉANO ÁRTICO

Cresta

CORRIENTE EN CHORRO

AMÉRICA DEL NORTE

Temperaturas oceánicas superficiales más cálidas

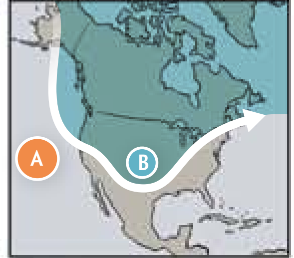
OCÉANO PACÍFICO

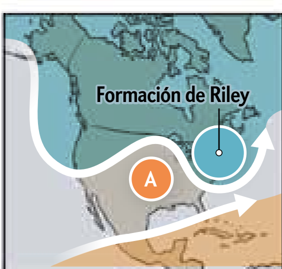
La pronunciada cresta produce un enorme valle que se extiende hacia el sur, sobre casi todo el este de Norteamérica, y permite el descenso de una masa de aire ártico helado que genera un marcado contraste térmico con las cálidas aguas de la costa atlántica (efecto regional).

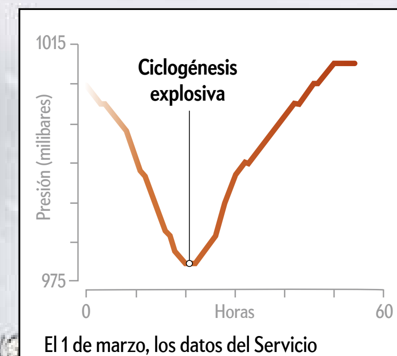


La alteración de la corriente en chorro (una leve ondulación dentro del patrón general de crestas y valles) se desplaza hacia al este y se aplana, pero al alcanzar el fuerte contraste de temperaturas atmosféricas de la costa este, se revigoriza (efecto regional) y obtiene energía de una corriente en chorro subtropical que atraviesa el sur de EE.UU. (variabilidad natural).









El 1 de marzo, los datos del Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. sobre la tormenta que se gesta cerca de mi casa anuncian una inminente «ciclogénesis explosiva» (un descenso abrupto de la presión atmosférica en el interior de la tormenta), que hará que Riley «explote» en cuanto a tamaño e intensidad (efecto regional).

Los vientos de 130 km/h de Riley azotan Nueva Inglaterra el 2 de marzo, y derriban árboles y tendidos eléctricos en un área extensa. Las intensas lluvias inundan algunas zonas y en otras caen 7,5 centímetros de nieve por hora.

Olas de hasta cuatro metros y medio embisten contra las casas a lo largo de la costa de Massachusetts.

El ciclón permanece estancado cerca de la costa de Nueva Inglaterra durante más de dos días y continúa descargando viento, lluvia, nieve y un intenso oleaje. Un anticiclón de bloqueo cerca de Groenlandia lo obstaculiza (otro efecto regional del cambio climático que ocurre cada vez más en el Atlántico Norte).



Finalmente, Riley se marcha el 4 de marzo, dejando atrás daños valorados en miles de millones de dólares.

FUENTES: ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE LA ATMÓSFERA Y EL OCÉANO DE EE.UU. (*corriente en chorro y temperaturas del océano Pacífico en la cuarta viñeta, datos en la quinta y sexta viñetas y trayectoria del ciclón en la octava*); UNIVERSIDAD DE MAINE (*temperaturas en la segunda y tercera viñetas y temperaturas atmosféricas del Ártico en la cuarta*); SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DE EE.UU. (*gráfico de la ciclogénesis explosiva*); MATT TWOMBLY (*ilustración*)

ártico se desplace considerablemente hacia el sur, creando un marcado contraste térmico con las cálidas aguas de la costa este de EE.UU. La atmósfera detesta los contrastes de temperatura y trata de contrarrestarlos generando tormentas donde se mezclan masas de aire. Los ciclones explosivos constituyen un ejemplo extremo de ese proceso. Esta configuración de crestas y valles, que se ha vuelto más habitual en los últimos inviernos, tiende a generar ciclones en la costa oriental norteamericana.

Y, en efecto, los datos del Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. dibujaban un escenario de ciclogénesis explosiva, un fenómeno que se produce cuando la presión atmosférica de una tormenta desciende más de 24 milibares en 24 horas, lo que hace que «explote» en cuanto a tamaño e intensidad. Mi barrio estaba en el punto de mira. Al atardecer del 2 de marzo llegaron los vientos huracanados, acompañados de lluvia y nieve, apagones y una intensa erosión causada por las grandes olas y las marejadas ciclónicas (subidas del nivel del mar). Preocupados por la posibilidad de que uno de los altos pinos del jardín cayera sobre nuestra casa, mi gato y yo (mi marido estaba fuera) preferimos dormir en el sofá del salón en vez de usar el dormitorio de la planta superior. Durante la noche, el ensordecedor rugido del viento ahogó el estruendo de los veinte grandes árboles que cayeron a nuestro alrededor, asombrosamente sin tocar nuestro tejado.

Obstaculizada por un anticiclón de bloqueo cercano a Groenlandia, la tormenta tardó en marcharse y devastó media docena de estados con sus vientos huracanados. El ciclón causó nueve víctimas mortales, dejó sin electricidad a más de dos millones de personas (durante cinco días en nuestra ciudad) e inundó comunidades costeras.

UN INVIERNO HORRIBLE

Esta serie de destructivos ciclones en la costa este de EE.UU. no fue el único evento impulsado por el cambio climático durante el invierno de 2018. Parisinos y venecianos sufrieron las peores inundaciones del último medio siglo como consecuencia de las persistentes lluvias, y unos letales vendavales azotaron Alemania y el norte de Francia. La ciudad de Davos, en Suiza, quedó enterrada bajo una espesa capa de nieve justo mientras la flor y nata de la sociedad trataba de llegar a la reunión anual del Foro Económico Mundial.

En Norteamérica, los titulares se los llevaron los «latigazos meteorológicos», transiciones bruscas entre eventos extremos persistentes. Aunque aún no hay muchas investigaciones sobre ellos, cada vez hay más pruebas de que la incidencia de estos cambios radicales está aumentando y de que intervienen los tres factores climáticos descritos.

Veamos un ejemplo: durante tres semanas del mes de enero, el este de EE.UU. se vio castigado por un frío tan glacial que las iguanas del sur de Florida caían de los árboles aletargadas. Mientras tanto, los estados del oeste disfrutaban de temperaturas por encima de lo normal. A comienzos de febrero se produjo el primer latigazo: una repentina inversión de la configuración de la corriente en chorro causó un calor sin precedentes en cientos de ciudades del este (con temperaturas que subieron más de 22 grados Celsius en 24 horas y devolvieron la vida a las iguanas) y sumió los estados del oeste en un frío intenso. En el «campo de batalla» entre las masas de aire oriental y occidental se desencadenaron intensas tormentas que causaron las peores inundaciones de las últimas décadas en el valle del Misisipi. La frecuencia de las lluvias torrenciales en esa zona ha aumentado alrededor de un 40 por ciento desde la década de 1950.

Los factores globales, regionales y de interacción habían vuelto a actuar. El calentamiento y la mayor humedad a escala global sin duda les dieron un impulso a esos eventos extremos. Y las ondulaciones regionales de la corriente en chorro (las mismas que contribuyeron a la sucesión de ciclones explosivos) se habían encargado de preparar el terreno. Los latigazos meteorológicos también azotaron EE.UU. y Canadá en febrero de 2019: en algunas áreas, las temperaturas experimentaron «rebotes» de unos 30 grados Celsius (y la sensación térmica, de más de 55 grados) en unos pocos días.

UN VERANO SOFOCANTE Y PASADO POR AGUA

El verano de 2018 también presentó un buen surtido de fenómenos meteorológicos adversos en el hemisferio norte, en gran parte exacerbados por el cambio climático. Mientras Japón, Texas e incluso Escandinavia se cocían durante semanas, la costa este de EE.UU. chapoteaba en medio de la estación más húmeda registrada hasta la fecha. Pertinaces sequías asolaron el oeste de EE.UU. y algunas regiones de Europa y Oriente Medio, lo que contribuyó a una trágica oleada de incendios que costaron 20.000 millones de dólares tan solo en California. Las condiciones estivales extremas echaron a perder cosechas, facilitaron la proliferación de algas tóxicas, paralizaron los sistemas de refrigeración de reactores nucleares y causaron apagones en cuatro continentes.

Algunos de esos efectos guardaban una clara relación con el factor global: unas temperaturas medias más elevadas causan olas de calor más intensas, mientras que una mayor cantidad de vapor de agua fomenta los chubascos veraniegos y contribuye al aumento de las temperaturas nocturnas, al absorber calor adicional cerca de la superficie. La combinación de calor excepcional y humedad (en especial por la noche) puede resultar mortal, puesto que al organismo le cuesta regular la temperatura mediante la evaporación del sudor. Miles de personas sin aire acondicionado murieron en todo el mundo.

La influencia del clima en la corriente en chorro estival no es tan obvia y constituye —literalmente— un área «candente» de investigación. Lo que sí está claro es que tanto los factores globales como los regionales favorecen una corriente en chorro inusualmente ondulada, como la que dejó en Escandinavia continuas olas de calor, sequías e incendios. Las temperaturas que se registraron allí entre mayo y julio rompieron récords que databan de hace 260 años.

¿Cuál es el papel de los cambios regionales? Durante la primavera y el verano se calienta una franja de tierra situada al sur de Canadá y de las costas árticas rusas. Allí, el manto de nieve primaveral se funde cada vez antes, y la pérdida de esa superficie, muy reflectante, deja el suelo expuesto a un intenso sol primaveral que lo seca prematuramente. Como la tierra seca se calienta mucho más deprisa que la húmeda, las temperaturas aumentan. Eso adelanta el inicio del verano y hace que la corriente en chorro se curve hacia el norte antes de lo habitual, lo que permite la llegada de aire caliente a latitudes elevadas.

Esa banda de tierra anormalmente cálida puede ayudar a que la corriente en chorro se bifurque, un fenómeno que es común durante el invierno pero no tanto en verano. Los sistemas meteorológicos a menudo permanecen atrapados durante largos períodos de tiempo entre las dos ramas, ya que en esa región apenas soplan vientos que los desplacen. Durante el verano de 2018, la corriente en chorro estuvo bifurcada gran parte del tiempo sobre Eurasia y Norteamérica, lo que generó condiciones permanentemente cálidas y secas en algunas regiones, y

prolongados períodos de lluvias en otras. Se batieron récords en ambos continentes.

ABRÓCHENSE LOS CINTURONES

Los fenómenos meteorológicos extremos de 2018 no fueron más que un avance de la película completa, que los espectadores de todo el planeta podrán presenciar a medida que continúen acumulándose los gases de efecto invernadero. Algunas consecuencias de los efectos globales (océanos más cálidos, una atmósfera más caliente y húmeda) son obvias y directas. Buena parte de la investigación se centra en desenmarañar los efectos regionales y su interacción con la variabilidad natural. Analicemos algunos ejemplos.

Hay indicios de que la zona tropical que bordea el ecuador se ha ensanchado hacia los polos. Eso hace que la trayectoria de las tormentas se desplace hacia los polos y algunas regiones templadas se vuelvan más cálidas y secas. Los síntomas más claros se observan en las zonas secas que definen los límites norte y sur de los trópicos, como el sur de California, el Mediterráneo y Australia, donde sequías y olas de calor cada vez más intensas acaparan titulares en los periódicos. Los científicos tratan de comprender la contribución de las partículas de polvo y hollín suspendidas en el aire, que alteran las temperaturas atmosféricas y la formación de nubes.

Otro factor regional bajo escrutinio es la aparente ralentización de la corriente del Golfo, una gran corriente oceánica que se origina en el golfo de México, bordea la costa este de EE.UU. y luego atraviesa el Atlántico Norte en dirección al Reino Unido. Se trata de la rama superficial de la circulación meridional de retorno del Atlántico, y su ralentización alteraría tanto el clima como la pesca a ambos lados del océano. Aunque no disponemos de muchos datos oceánicos subsuperficiales, las peculiaridades observadas en la (bien estudiada) temperatura de la superficie —como el calentamiento anómalo a lo largo de la costa este de EE.UU. y la presencia de una masa de agua fría al sur de Groenlandia— indican que, en efecto, este enorme sistema de circulación podría estar frenándose. Cualquier variación en el patrón de temperaturas oceánicas modificaría la intensidad y trayectoria de las tormentas. Así, la hiperactividad observada en los últimos años en el Atlántico Norte podría ser una respuesta a la ralentización de la corriente del Golfo, además de a las ardientes aguas que seguramente impulsaron los ciclones explosivos del invierno de 2018.

Los anticiclones de bloqueo constituyen otro fenómeno regional al que conviene prestar atención. Las observaciones indican que ocurren cada vez más a menudo en zonas como Groenlandia y el oeste de Rusia, pero los modelos atmosféricos tienen dificultades para predecir su desarrollo y desaparición. Estos remolinos atmosféricos pueden formarse por diversas razones, unas relacionadas con la variabilidad natural y otras con el cambio climático. Por ejemplo, los restos de las tormentas tropicales pueden, de forma natural, inyectar energía en la corriente en chorro, haciendo que se combe y genere remolinos huérfanos. Pero a medida que los océanos se calientan, las tormentas tropicales podrían sobrevivir en latitudes más septentrionales y hasta más entrado el otoño, y eso incrementaría la probabilidad de que se produzca un anticiclón de bloqueo (que, a su vez, podría desviar los huracanes y otros sistemas meteorológicos en direcciones poco habituales) en una colisión con la corriente en chorro.

En octubre de 2018, por ejemplo, el huracán Leslie se entretuvo durante más de dos semanas en el Atlántico hasta acabar donde ningún huracán había llegado antes: al oeste de Portugal, donde descargó fuertes vientos y lluvias torrenciales sobre la península ibérica. Un fuerte anticiclón de bloqueo situado en el noreste de Europa causó la ondulación de la corriente en chorro que capturó a Leslie y lo transportó a través del Atlántico.

Un último factor regional es el vórtice polar estratosférico, que apareció frecuentemente en las noticias durante el invierno de 2018 —y de nuevo en el invierno de 2019— y que muestra un comportamiento anómalo. Se trata de un cinturón de fuertes vientos que (solo en invierno) rodean una masa de aire gélido a unos 50 kilómetros de altura sobre el Polo Norte. Cada pocos años, determinadas condiciones pueden deformar el vórtice o incluso dividirlo en dos o más cinturones de menor tamaño que tienden a desplazarse hacia el sur, y generar así episodios de frío intenso. Simultáneamente, el aire cálido del sur invade el Ártico y trastoca las temperaturas. Cuando el vórtice polar se dividió a finales del pasado enero, hacía más calor cerca del Polo Norte que en Chicago. Tales «calentamientos estratosféricos repentinos» pueden producirse de forma natural, pero últimamente son más frecuentes. Varios estudios recientes han hallado que la drástica pérdida de hielo marino en el océano Ártico, al noroeste de Rusia, podría ayudar a desencadenar estas alteraciones del vórtice. A medida que se acentúa el calentamiento global, quienes vivimos en las latitudes medias podríamos sufrir los ataques del vórtice polar cada vez más a menudo.

Pese a que algunos aspectos del experimento no controlado al que estamos sometiendo a nuestro clima siguen sin estar claros, la ciencia está demostrando que podemos responsabilizar al cambio climático de la amplificación de los fenómenos meteorológicos extremos y sus consecuencias. Entender bien los vínculos nos permitirá tener una visión de futuro más clara y prepararnos para afrontar los efectos en la agricultura, la seguridad internacional, la vida marina, los bosques, los recursos hídricos, las infraestructuras y la salud humana; efectos que ya pueden apreciarse y que solo empeorarán.

Sin embargo, hay razones para el optimismo. Esta racha de mal tiempo ha arrojado luz sobre la bien financiada campaña destinada a desinformar a la gente y generar dudas respecto al cambio climático. Digan lo que digan los escépticos, la variabilidad natural no es capaz de explicar los fenómenos extremos que ya hemos empezado a ver y experimentar. Las encuestas recientes demuestran que la mayoría de los ciudadanos acepta por fin que el cambio climático es real y está causado por el ser humano. Las aseguradoras, los líderes militares, los promotores inmobiliarios y las administraciones municipales están respondiendo a los riesgos tangibles que amenazan la vida y la propiedad. Tal vez estemos preparados finalmente para enfrentarnos al difícil camino que tenemos por delante. IyC

PARA SABER MÁS

More-persistent weak stratospheric polar vortex states linked to cold extremes. Marlene Kretschmer et al. en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99, n.º 1, págs. 49–60, enero de 2018.
Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. L. Caesar et al. en *Nature*, vol. 556, págs. 191–196, abril de 2018.
Re-examining tropical expansion. Paul W. Staten et al. en *Nature Climate Change*, vol. 8, págs. 768–775, septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La corriente del Golfo y el invierno europeo. Stephen C. Riser y M. Susan Lozier en *IyC*, abril de 2013.
Colapso ártico. Jennifer A. Francis en *IyC*, junio de 2018.
El amplificador meteorológico. Michael E. Mann en *IyC*, mayo de 2019.

NANOCIENCIA

EL CALOR A ESCALA NANOMÉTRICA

Durante doscientos años los físicos han descrito el transporte de calor mediante la ley de Fourier. Ahora, los avances en nanotecnología demandan una comprensión más sutil del fenómeno

Olivier Bourgeois, Dimitri Tainoff, Natalio Mingo, Bjorn Vermeersch y Jean-Louis Barrat

LOS AEROGELES DE SÍLICE son materiales muy livianos que ofrecen un sorprendente aislamiento térmico. Esta resistencia a la conducción del calor obedece a su estructura nanométrica: a escalas diminutas, la ley de Fourier ya no describe correctamente el transporte del calor.



LOS AUTORES

Olivier Bourgeois es profesor de investigación en el Instituto Néel de Grenoble, perteneciente al Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) francés.

Dimitri Tainoff investiga en la Universidad de Grenoble-Alpes y en el Instituto Néel.

Natalio Mingo y **Bjorn Vermeersch** trabajan en el Laboratorio para la Innovación en Nanomateriales y Tecnologías de Nuevas Energías (LITEN) del Centro de Energía Atómica de Grenoble.

Jean-Louis Barrat es profesor de física en la Universidad de Grenoble-Alpes y miembro del Laboratorio Interdisciplinar de Física de Grenoble.

En 2018 se cumplieron 250 años del nacimiento del célebre físico y matemático francés Joseph Fourier. Su nombre suele asociarse a cierta transformación matemática, la «transformada de Fourier», la cual puede aplicarse a casi cualquier función y que hoy resulta indispensable en todo tipo de trabajos científicos y técnicos. También acostumbra a vincularse con las series de funciones sinusoidales que permiten representar cualquier función periódica lo suficientemente regular y que, al igual que la transformada homónima, revisten una enorme utilidad en numerosos ámbitos.



LA OBRA PRINCIPAL DE JOSEPH FOURIER (1768-1830) fue su *Teoría analítica del calor*, publicada en 1822. En ella el francés desarrolló los métodos matemáticos que más tarde le harían célebre. Al margen de su carrera como científico, Fourier se implicó en la política de su tiempo y ocupó diferentes cargos, entre ellos el de prefecto. También tomó parte en la expedición científica que tuvo lugar durante la Campaña de Egipto emprendida por Napoleón.

No obstante, los trabajos matemáticos que tanta fama granjearon a Fourier se originaron en sus intentos por entender un problema físico: el de la propagación del calor. Tales investigaciones fueron recogidas en la obra *Teoría analítica del calor*, publicada en 1822. En este contexto, su nombre se asocia a una ley concebida para describir el flujo del «calórico», término que por aquel entonces designaba el hipotético fluido del que el calor se consideraba una manifestación externa.

En aquella época se debatía vigorosamente sobre la naturaleza del problema: ¿se debía el calor a un fluido real, como muchos pensaban, o no era más que un efecto del movimiento de los constituyentes microscópicos de la materia? Sin tomar partido sobre esta difícil cuestión, Fourier se propuso describir la difusión del calor mediante una ecuación local, válida en el seno de todo material sólido. Aquí *local* significa que los términos que aparecen en ella se refieren a un mismo punto del espacio; es decir, que no aparecen simultáneamente una cantidad evaluada en un punto A y otra calculada en un punto distante B.

La expresión hallada por Fourier establece que el flujo de calor en un punto (la cantidad de energía que atraviesa una unidad de superficie por unidad de tiempo) es proporcional al gradiente de temperatura en dicho punto; esto es, a la tasa de variación de la temperatura en el espacio. Si por simplicidad consideramos el fenómeno en una sola dimensión (pensemos en la propagación del calor a lo largo de un hilo metálico fino), la ley de Fourier adopta la forma

$$J(x) = -k \, \mathrm{d}T(x)/\mathrm{d}x \, ,$$

EN SÍNTESIS

Hace doscientos años, Joseph Fourier enunció una relación entre el flujo de calor en el seno de un material y el gradiente de temperatura al que está sometido.

Dicha ley es válida en la mayor parte de los materiales a escalas macroscópicas. Sin embargo, a distancias nanométricas sufre importantes desviaciones.

El estudio de la propagación del calor a distancias cortas ha de tener en cuenta la física de los fonones, los cuantos de vibración de un material.

Tales modificaciones tienen importantes consecuencias para numerosas aplicaciones, desde la microelectrónica hasta el diseño de materiales nanoestructurados.

donde $J(x)$ designa el flujo de calor en el punto x, $T(x)$ denota la temperatura en dicho punto y dT/dx es la derivada de T con respecto a la coordenada x. La constante k representa la conductividad térmica, una propiedad característica de cada material. El signo negativo puede explicarse con facilidad: se debe a que el flujo de calor procede en sentido opuesto al del gradiente de temperatura. En otras palabras, el calor se transmite siempre del lado caliente al frío, nunca al revés.

UNA LEY FENOMENOLÓGICA

La ley de Fourier es fenomenológica: describe el fenómeno observado (la propagación del calor), pero no se basa en el conocimiento de los mecanismos subyacentes. Manifiesta también el carácter local del transporte de calor: el hecho de que esta forma de energía no puede desaparecer en un punto para aflorar al instante en un lugar alejado. En su momento, la formulación local de la ley de Fourier supuso una notable innovación conceptual en la que se inspiraron otros avances del siglo XIX relativos a los fenómenos de transporte. Tal fue el caso de la ley de Ohm para el flujo de electricidad, la ley de Fick para la difusión de un fluido en el seno de otro, la ley de Darcy para la percolación de un líquido en un sólido poroso, etcétera.

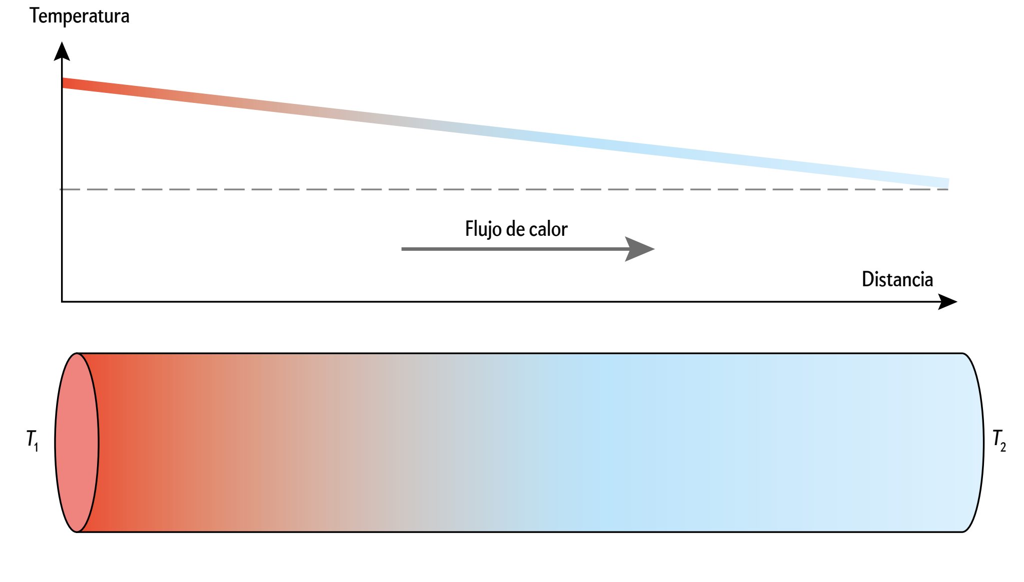
El control de los problemas térmicos se ha convertido en un aspecto clave de la microelectrónica

Al eliminar la posibilidad de intercambios a distancia y al desligar las propiedades del material (como la conductividad térmica) de su geometría, el carácter local de la ley Fourier condujo a formular los fenómenos de transporte en forma de ecuaciones diferenciales locales, aquellas donde aparecen la función que deseamos determinar y sus derivadas. Tras suplementarlas con las condiciones físicas que imperan en los bordes de la región considerada, es posible llegar a una solución. Siguiendo esta vía, Fourier estableció los fundamentos del análisis matemático que hoy lleva su nombre.

La ley de Fourier refleja el segundo principio de la termodinámica, el cual dicta que el calor siempre pasa de las zonas calientes a las frías, pero nunca al revés. Sin embargo, no reviste un carácter fundamental, pues podrían plantearse otras expresiones para el flujo de calor. A pesar de ello, su robustez es innegable: se cumple bajo todo tipo de condiciones y en todo tipo de materiales sólidos, líquidos o gaseosos (si bien en los dos últimos casos el transporte de calor tiene lugar sobre todo por convección, es decir, por desplazamientos macroscópicos de la materia, y no por conducción). Es por tanto un reto para la ciencia comprender el origen microscópico de esta ley y discernir en qué casos la propagación del calor podría seguir otra pauta. No se trata de un desafío puramente científico, sino también tecnológico, ya que este fenómeno de transporte se da en todo tipo de dispositivos.

En la segunda mitad del siglo XIX, James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann postularon que un gas se hallaba formado por un gran número de pequeñas partículas independientes. Este punto de vista microscópico trata el calor como una forma de energía asociada a los movimientos erráticos y desordenados (la «agitación térmica») de las moléculas. En él, la temperatura aparece como una magnitud proporcional a la energía cinética media de las partículas, y la propagación del calor corresponde a la difusión de esa agitación térmica como consecuencia de las numerosas colisiones entre moléculas. Durante el siglo siguiente, tales teorías fueron perfeccionadas y generalizadas en el marco de la física estadística y de la teoría de los sólidos. Ello permitió justificar la ley de Fourier para materiales lo suficientemente simples y homogéneos e incluso posibilitó calcular la conductividad térmica de algunos materiales.

En todo caso, no fue sino hasta finales del siglo XX cuando se desarrollaron las herramientas experimentales y computacionales necesarias para estudiar transferencias de calor a escala microscópica. Gracias a ello, hoy disponemos de una comprensión mucho más profunda de los fenómenos de conducción térmica en materiales complejos, lo que ha hecho aflorar algunos límites a la ley de Fourier a ciertas escalas. Estos avances se hallan vinculados a la nanociencia y la nanotecnología, así como al fenómeno de la termoelectricidad, la capacidad de obtener energía eléctrica a partir de los flujos de calor presentes en el entorno.



SEGÚN LA LEY DE FOURIER, el flujo de calor en un punto es proporcional y opuesto al gradiente de temperatura en dicho punto. En el caso de una varilla cilíndrica homogénea, aislada y cuyos extremos se mantienen a temperaturas T_1 y T_2, la ley de Fourier establece que el perfil de temperatura es lineal y que el flujo de calor a lo largo del cilindro es constante, en acuerdo con las observaciones.

DESAFÍO TÉCNICO

Durante los dos siglos que han transcurrido desde su formulación, la ecuación de Fourier ha sido de gran relevancia en el diseño de máquinas térmicas, motores y todo tipo de artefactos tanto industriales como domésticos. En los albores del siglo xxi, sin embargo, profundizar en los principios que rigen la propagación microscópica del calor ha dejado de ser una inquietud meramente teórica para convertirse en un imperativo tecnológico.

Una razón obedece a los incesantes progresos que ha experimentado la miniaturización de los componentes electrónicos. Ello ha implicado un aumento en la densidad de potencia (energía por unidad de tiempo y unidad de volumen) disipada en algunos dispositivos, como los transistores de alta movilidad electrónica (HEMT, por sus siglas en inglés) o los diodos electroluminiscentes (ledes). Como resultado, numerosos aparatos se enfrentan a un calentamiento que puede mermar de manera considerable su vida útil. Cuando la temperatura de funcionamiento de un HEMT aumenta en 50 grados Celsius, por ejemplo, su vida se reduce a la décima parte. Ante esta situación, el control adecuado de los problemas térmicos se ha convertido en un aspecto clave de la microelectrónica. Y este desafío afecta también a otras áreas, como el diseño de materiales aislantes para la construcción o para el revestimiento de turbinas.

En 2014, David Cahill, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y sus colaboradores ofrecieron algunas cifras concretas relativas a tales retos. Por ejemplo, aumentar la eficiencia térmica en las nuevas memorias de cambio de fase para el almacenamiento de datos podría brindar una conmutación más rápida y un tamaño más reducido. Con los ajustes adecuados, la energía requerida para conmutar el valor de un bit podría reducirse entre 1000 y 10.000 veces con respecto a los valores actuales. De igual modo, disminuir en un 50 por ciento la conductividad térmica de los revestimientos de las turbinas aportaría un aumento de eficiencia que equivaldría a veinte años de desarrollo de nuevas aleaciones.

Por desgracia, la ecuación del calor de Fourier no resulta útil para afrontar los retos que plantean estas nuevas técnicas. Cuando las estructuras implicadas se reducen a dimensiones inferiores al micrómetro, los materiales dejan de comportarse como conductores térmicos macroscópicos. En 2003, el equipo de Arun Majumdar, de la Universidad de California en Berkeley, midió por primera vez la conductividad térmica de un nanohilo de silicio cristalino de 100 nanómetros de diámetro (0,1 micrómetros). Al hacerlo, los investigadores comprobaron que la conductividad térmica había descendido a la mitad de la que presentaría un cristal de silicio macroscópico. Dicho efecto es aún mayor para nanohilos más delgados.

EFECTOS CUÁNTICOS

¿A qué se debe semejante comportamiento? A tales escalas, los fenómenos cuánticos cobran relevancia. En particular, la energía térmica no se transmite en una cantidad cualquiera, sino en pequeños paquetes o cuantos de energía. Una de las principales contribuciones a los efectos térmicos procede de la energía de vibración de las moléculas. En tal caso, los cuantos correspondientes reciben el nombre de fonones.

En 1929, el físico germano-británico Rudolf Peierls derivó una ecuación que describía la propagación de fonones a escala microscópica. Su enfoque considera los cuantos de vibración de la red cristalina como partículas que viajan libremente hasta que colisionan, ya sea entre ellas o contra obstáculos externos, como las imperfecciones de la red. Cuando eso sucede, se separan o se recombinan. A temperatura ambiente, algunos fonones se propagan por la red cristalina a lo largo de cientos o incluso miles de nanómetros antes de sufrir una colisión. Por consiguiente, en regiones muy reducidas, el calor que transmiten no se propaga por difusión, como asume implícitamente la ley de Fourier, sino con ciertas características particulares de un gas rarificado en el que las colisiones entre moléculas son muy poco frecuentes. Se sigue por tanto que, a estas escalas microscópicas, el transporte de calor obedece leyes muy distintas de las que rigen a distancias macroscópicas.

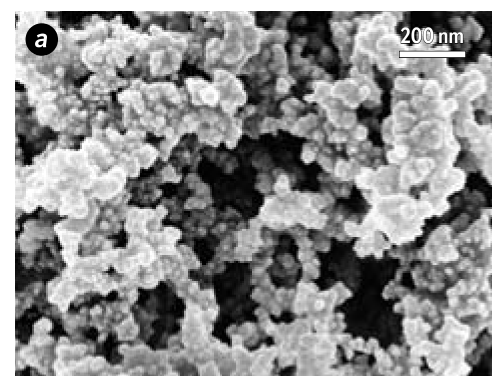
Las consecuencias de dicho comportamiento pueden resultar drásticas. En un trabajo reciente, uno de nosotros (Vermeersch) ha calculado el aumento de la temperatura local con respecto a la ambiente para cierta clase de transistores de nueva generación. Para una potencia típica de 100 microvatios disipada en el canal del transistor, cuya longitud asciende a unos 100 nanómetros, el incremento de temperatura tomando en cuenta el transporte de fonones supera en más de 20 grados al predicho por la ecuación de Fourier.

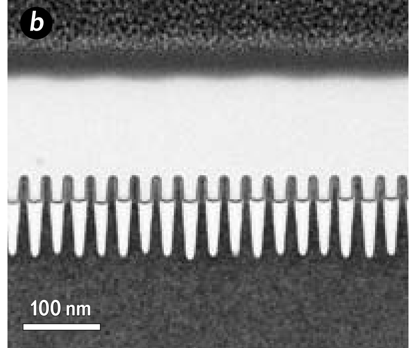
NUEVOS MATERIALES

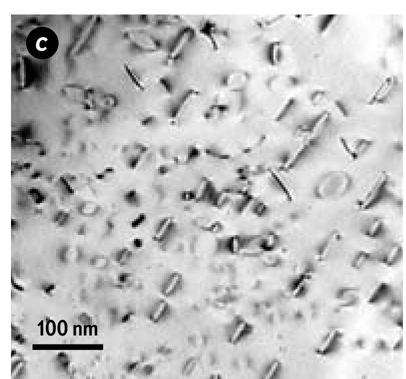
Otro caso de interés lo hallamos en los materiales nanoestructurados,

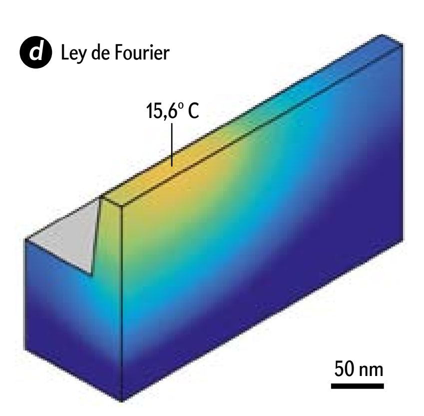
20 micrómetros

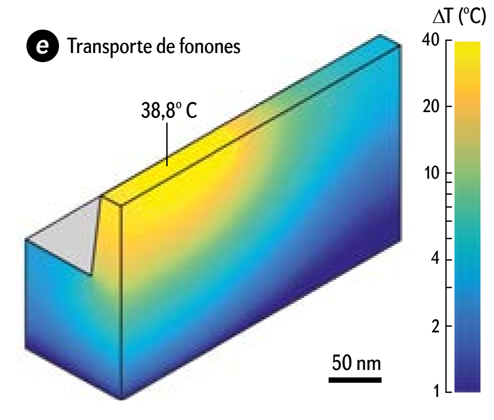
ESTE DISPOSITIVO, elaborado por el equipo de uno de los autores (Bourgeois) en el Instituto Néel de Grenoble, mide la conducción térmica de dos nanohilos (*zona central de la ampliación*) suspendidos entre dos membranas cuya temperatura se registra mediante sendos termómetros. Funciona hasta los 50 milikelvin, una temperatura cercana al cero absoluto, y permite estudiar aquellos regímenes de conducción del calor que se alejan notablemente de los descritos por la ley de Fourier.











UN GRAN NÚMERO de técnicas modernas emplean dispositivos o materiales estructurados a la escala nanométrica. Algunos ejemplos los hallamos en el humo de sílice, usado como aislante térmico (*a*), en los transistores de tipo finFET (*b*) o en los materiales termoeléctricos basados en silicio (*c*). A escalas nanométricas la ley de Fourier ya no describe de manera satisfactoria el transporte de calor. Así, el aumento de temperatura en un transistor calculado mediante la ley de Fourier (*d*) resulta unos 20 grados menor que el que se obtiene al tomar en cuenta la propagación de fonones (*e*).

ZAE BAYERN (*a*); IBM RESEARCH (*b*); KEN KUROSAKI, UNIVERSIDAD DE OSAKA (*c*); BJORN VERMEESCH/CEA-LITEN (*d* y *e*)

aquellos caracterizados por presentar estructuras con dimensiones comprendidas entre la escala molecular y la macroscópica. Un ejemplo nos lo proporcionan los aerogeles de sílice. Se trata de materiales compuestos complejos, extremadamente livianos y que se cuentan entre los aislantes térmicos más eficientes que se conocen: a igualdad de prestaciones térmicas, los aislantes formados por aerogeles de sílice son unas tres veces más delgados que los habituales. Su uso sistemático facilitaría el aislamiento térmico de edificios, lo que supondría un paso importante en lo que respecta a la reducción del consumo energético.

Los materiales nanoestructurados se hallan también en el centro de las recientes técnicas de recuperación de energía eléctrica basadas en el efecto termoeléctrico. Descubierto en el siglo XIX por Jean-Charles Peltier y Thomas Seebeck, este fenómeno permite convertir un flujo de calor en una diferencia de potencial eléctrico, así como emplear una corriente para desplazar el calor y conseguir un efecto de refrigeración. Un 40 por ciento de toda la energía producida por la humanidad se disipa en forma de calor. Como consecuencia, la posibilidad de convertir en energía eléctrica una parte de tales pérdidas, aunque fuera mínima, reviste un gran interés en el marco de los retos energéticos actuales.

A pesar de su evidente interés, la instalación a gran escala de dispositivos termoeléctricos ha tropezado con el escollo que supone la escasa eficiencia de conversión de los materiales termoeléctricos conocidos, como el telururo de bismuto (Bi_2Te_3). Pero la conducción térmica desempeña un papel clave de esta eficiencia. Por ejemplo, en el dispositivo termoeléctrico más extendido, el «módulo Peltier» que se usa en los frigoríficos silenciosos de las habitaciones de hotel, la extracción de calor se torna más eficiente si la conductividad térmica es baja, ya que ello impide que el calor extraído gracias a la electricidad regrese hacia la parte enfriada del dispositivo.

Desde hace veinte años, la eficiencia de la conversión termoeléctrica ha ido aumentando progresivamente gracias a una mejor comprensión del transporte térmico a pequeña escala. En 2012, el equipo de Mercouri Kanatzidis, de la Universidad Noroccidental de EE.UU., demostró la posibilidad de duplicar la eficiencia de conversión mediante el uso de semiconductores dopados. En este caso, la conductividad térmica se reducía gracias a la introducción de desorden a varias escalas: a distancias nanométricas, debido al desorden en la aleación (ya que los átomos del dopaje reemplazan a los del semiconductor en nodos aleatorios de la red cristalina); a longitudes de decenas de nanómetros, debido a la inclusión de elementos metálicos; y a escalas micrométricas, como consecuencia de las texturas que aparecen en las fronteras entre microcristales. El desorden en el seno de un material se lleva así al extremo, lo que modifica fuertemente la propagación de fonones a escala local. Aunque estas condiciones no permiten definir localmente una conductividad térmica como hace la ley de Fourier, esta vuelve a resultar válida a escalas mayores, características de los dispositivos termoeléctricos.

El desarrollo de materiales termoeléctricos más eficientes permitiría todo tipo de innovaciones: desde la recuperación de energía en los gases de escape de los vehículos hasta el diseño de sensores completamente autónomos que funcionarían sin baterías ni cables, ya que sus necesidades energéticas quedarían cubiertas gracias a los flujos de calor del entorno.

UNA NUEVA NANOINGENIERÍA

Lo que acabamos de describir para la termoelectricidad ilustra un principio clave de la nanoingeniería actual: estructurar los

Electrones, fonones y conducción térmica

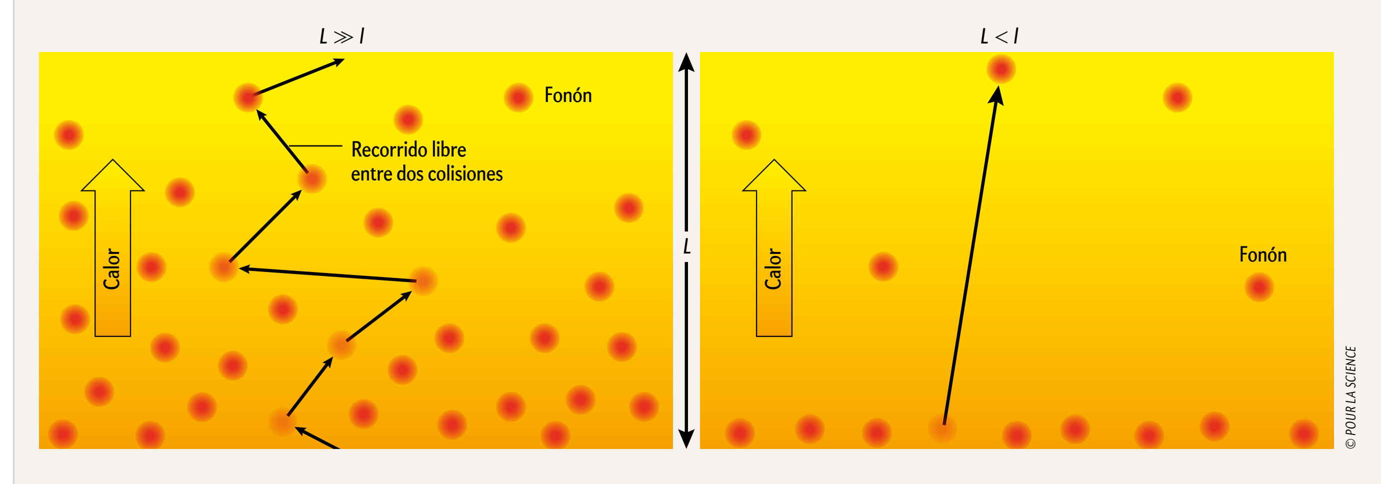
La ley de Fourier constituye una relación empírica que establece que, en cada punto de un sólido, el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura. Pero ¿qué mecanismos son responsables de la transmisión del calor de un punto a otro? En la mayoría de los sólidos cristalinos, en los que los átomos y las moléculas solo se agitan en torno a sus posiciones de equilibrio (sin desplazarse), los agentes que intervienen a escala microscópica son dos: los electrones libres y los fonones.

Los electrones son los responsables de la conducción de la electricidad. Sin embargo, debido a su movimiento y sus colisiones, transmiten también energía en forma de calor. En un metal a temperatura ambiente, los electrones libres son los principales portadores de calor. No obstante, su contribución no basta para explicar por completo la conducción térmica, sobre todo a bajas temperaturas.

Ello se debe a que existe otra clase adicional de portadores: los fonones. En el seno de un aislante (un material carente de elec-

Posiciones de equilibrio de los átomos

En una red cristalina, las vibraciones de los átomos o moléculas en torno a su punto de equilibrio se propagan en forma de ondas (*a*). La energía de estas ondas está cuantizada: se transporta mediante fonones, excitaciones que se comportan tal y como lo haría una partícula. Siempre que su recorrido libre medio (*l*, la distancia promedio entre dos colisiones sucesivas) sea mucho menor que la longitud a lo largo de la cual se propagan (*L*), la conducción del calor seguirá la ley de Fourier (*b*). En cambio, cuando el recorrido libre medio *l* es mayor que *L*, el régimen de conducción se denomina «balístico» y sus propiedades cambian de manera considerable (*c*).



materiales a escala nanométrica permite modificar las propiedades de transporte de los fonones y, con ellas, las características térmicas de la muestra. Esto abre la puerta a lograr una conductividad térmica reducida y nuevas funcionalidades, como la «rectificación» del calor mediante diodos térmicos (dispositivos que solo permiten que el calor se propague en una dirección) o incluso su concentración. En particular, el confinamiento térmico se ha logrado en sistemas como superredes (superposiciones periódicas de capas finas de diversos materiales cristalinos), nanohilos, membranas o incluso en materiales de mayor tamaño pero estructurados a muy pequeña escala.

En la actualidad, las investigaciones en nanoingeniería térmica se concentran en algunos equipos de gran tamaño en EE.UU, como los del Instituto de Tecnología de Massachusetts o la Universidad de California en Berkeley, y, en Europa, en consorcios como el proyecto Nanoingeniería y Nanociencias Térmicas (www.thermalnano.eu), dirigido por el investigador del CNRS francés Sebastian Volz y en el que participan numerosos laboratorios. Estos esfuerzos resultarán clave en el desarrollo de numerosas aplicaciones basadas en un mejor aislamiento térmico, en la conversión de calor en electricidad y en un mejor control de los flujos térmicos. De hecho, algunos investigadores ya han comenzado a considerar la posibilidad de usar el calor para el transporte de información. De la ley de Fourier a la informática del futuro, el camino que ha seguido el estudio de los fenómenos de transporte térmico ha sido sin duda impresionante.

trones libres), los fonones son de hecho los únicos portadores de calor. ¿En qué consisten?

La materia sólida se compone de átomos que vibran sin cesar en torno a sus posiciones de equilibrio, un fenómeno conocido como agitación térmica. Las vibraciones de un átomo afectan a las de sus vecinos, lo que da lugar a ondas de vibración que se propagan por la red cristalina. No obstante, la mecánica cuántica dicta que la energía y la cantidad de movimiento transportadas por dichas vibraciones no pueden tomar cualquier valor: han de estar cuantizadas. En el seno de la red, los intercambios de energía y momento debidos a las vibraciones se llevan a cabo como si estas magnitudes fueran transportadas por partículas. Tales «cuasipartículas» (excitaciones de la red) son los fonones. El término procede del griego *phoné*, «voz», ya que los fonones son también los responsables de la propagación del sonido en los sólidos.

Como toda partícula cuántica, los fonones poseen un momento, una longitud de onda asociada y una energía. Y al igual que los electrones, aquellos fonones que se hallan en una zona caliente del material presentan energías relativamente elevadas. Al propagarse a lo largo del sólido, topan con obstáculos (superficies, defectos del cristal, impurezas, electrones u otros fonones) y, como resultado, van cambiando su dirección de propagación y ceden parte de su energía. Esta clase de procesos hacen que el calor se distribuya desde las zonas calientes hacia las frías.

La distancia media entre dos colisiones sucesivas de un fonón recibe el nombre de «recorrido libre medio». Esta distancia y la longitud de onda de los fonones son las dos escalas principales que caracterizan el transporte de calor. La pugna entre estas dos magnitudes típicas (comprendidas por lo general entre el nanómetro y el micrómetro) y las dimensiones del sólido determina los efectos térmicos y es la responsable de que la ley de Fourier pierda su aplicabilidad a distancias cortas.

En concreto, la ley de Fourier solo resulta válida cuando las dimensiones del sólido son mucho mayores que las otras dos escalas características del problema. Ello equivale a decir que, para que la conductividad térmica no dependa del tamaño del sistema, los fenómenos de transporte térmico deben observarse a una distancia lo suficientemente grande. Para objetos diminutos —y, en particular, cuando una de las dimensiones del material es menor que el recorrido libre medio de los fonones—, el tamaño de la muestra resulta determinante a la hora de describir sus propiedades de transporte térmico.

PARA SABER MÁS

Fourier's heat conduction equation: History, influence, and connections. T. N. Narasimhan en *Reviews of Geophysics*, vol. 37, págs. 151-172, febrero de 1999.

Nanoscale thermal transport II: 2003–2012. David G. Cahill et al. en *Applied Physics Reviews*, vol. 1, art. 011305, enero de 2014.

Nanophononics: State of the art and perspectives. Sebastian Volz et al. en *The European Physical Journal B*, vol. 89, art. 15, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Espumas superaislantes. Bernd Wicklein en *IyC*, mayo de 2015.

Cuando el calor se convierte en electricidad. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, julio de 2017.

INMUNOLOGÍA

Reinventar las vacunas

Una controvertida teoría sostiene que una sola vacuna, administrada de forma apropiada, puede proteger contra muchas más enfermedades que la que pretende evitar

Melinda Wenner Moyer

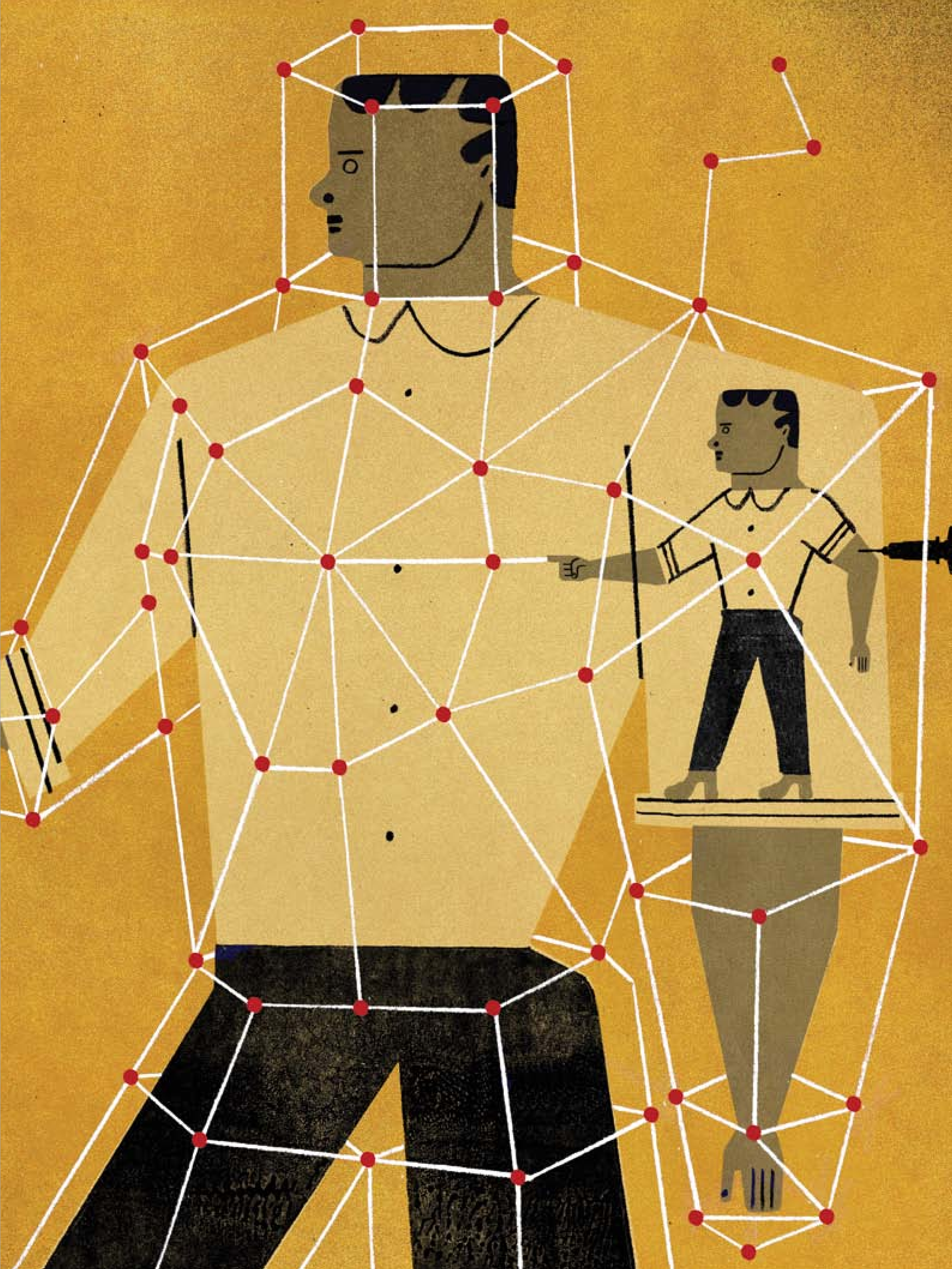
Ilustración de David Plunkert

EN SÍNTESIS

Las vacunas no solo inmunizan frente a enfermedades específicas. Algunas ofrecen una protección mucho más amplia, según una serie de estudios.

Estos indican que las vacunas elaboradas con microbios vivos pueden reducir a la mitad la mortalidad infantil global.

Tales trabajos, dirigidos por Peter Aaby y Christine Benn en Guinea-Bissau, también han recibido críticas por considerar que han sobrevalorado los resultados.



Melinda Wenner Moyer, bióloga molecular, escribe sobre biomedicina. Colabora con *Scientific American* y *The New York Times*. También es profesora del Instituto de Periodismo Arthur L. Carter de la Universidad de Nueva York.



UNA TARDE DE LA PASADA PRIMAVERA, LA BRISA SUAVIZABA EL CALOR DEL SOL abrasador de África occidental. De vez en cuando, un mango que el viento arrancaba de una rama caía con ruido sobre el tejado de chapa del centro de salud de Bissau, la mayor ciudad del pequeño país de Guinea-Bissau, en cuyo terreno rojizo no había caído una sola gota de lluvia desde hacía seis meses. Dentro del edificio, el aire era calmo y seco, y una hilera de mujeres y niños esperaba sudorosa.

María, una pequeña de 18 meses con unas trenzas gruesas y oscuras, me escudriñaba nerviosa sentada en el regazo de su madre. (El nombre de la niña se ha cambiado para proteger su privacidad.) Junto a ellas, Carlito Balé, un médico de voz suave, hablaba con la madre de María en criollo, una mezcla percusiva de portugués y varios dialectos africanos. Balé le explicaba que la niña reunía las condiciones para participar en un ensayo clínico. En él se pretendía comprobar si una dosis adicional de la vacuna contra el sarampión evitaría no solo esta dolencia, sino también otras infecciones infantiles que pueden ocasionar enfermedades graves y la muerte.

En EE.UU., donde las infecciones potencialmente mortales son raras, un ensayo de este tipo no reuniría muchos voluntarios. Pero en Guinea-Bissau, donde la vida está estigmatizada por décadas de escasos recursos y una atención médica deficiente, las familias hacían cola para ofrecerse. El país es uno de los más pobres del mundo y, según la CIA, la tasa de mortalidad infantil es la cuarta más alta entre 225 países. Las madres suelen tardar varios meses en poner nombre a sus bebés, porque uno de cada 12 morirá antes de llegar al año.

Los investigadores que dirigían el ensayo (el antropólogo Peter Aaby y la médica Christine Benn, a los que visité en Guinea-Bissau) han acumulado pruebas de que determinadas vacunas pueden impedir un gran número de epidemias atroces. Durante décadas han publicado centenares de estudios que sugieren que las vacunas atenuadas (elaboradas a partir de virus o bacterias debilitados pero vivos) evitan no solo las infecciones a las que van destinadas, sino también otras, como las respiratorias (incluida la neumonía), las hematológicas (incluida la septicemia) y las diarreicas. En una revisión realizada en 2016 y publicada en el *British Medical Journal* (*BMJ*), un equipo de investigadores comisionado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) analizó 68 artículos sobre la materia, muchos de los cuales correspondían a investigaciones de Aaby y Benn. El grupo concluyó que las vacunas del sarampión y de la tuberculosis reducían la mortalidad total más de lo que cabría esperar por su efecto sobre las enfermedades a las que iban destinadas. Algunos de los estudios evaluados por el equipo vincularon la vacuna del sarampión con una reducción del 50 por ciento de la mortalidad por cualquier causa.

Esta idea de que las vacunas atenuadas ejercen efectos inespecíficos, que además son importantes, tiene implicaciones que se extienden mucho más allá de África. En 2017, investigadores de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC, por sus siglas en inglés) comunicaron que la probabilidad de hospitalización de niños de entre 16 y 24 meses por infecciones no contempladas en la vacuna se reducía un 50 por ciento si la última inmunización recibida era a base de microbios vivos, en lugar de muertos (vacuna inactivada). Nuevos estudios parecen indicar que las vacunas atenuadas ofrecen una amplia protección porque estimulan una parte del sistema inmunitario que entabla combate contra todos los invasores externos y lo convierten en una defensa de primera línea. Frank Shann, pediatra del Hospital Real Infantil de Melbourne, afirma: «Aunque todavía quedan numerosos detalles por resolver, hoy no tengo ninguna duda de que las vacunas ejercen algunos efectos inespecíficos, porque distintos tipos de pruebas así lo indican».

No obstante, otros científicos no comparten esta certeza, por lo que el trabajo de Aaby y Benn es, en realidad, bastante controvertido. En primer lugar, la mayoría de los estudios de los dos investigadores no demuestran una relación de causa-efecto. Para Paul Fine, epidemiólogo especialista en enfermedades infecciosas de la Facultad de Higiene y Medicina Tropical de Londres, se trata de «supuestos efectos». Para empezar, la mayor supervivencia de los niños inmunizados con microbios vivos podría deberse a motivos que nada tengan que ver con las vacunas: tal vez esos niños gozaran de mejor salud. Para abordar estas cuestiones, Aaby y Benn han emprendido ensayos de intervención, como el que se le ha propuesto a María. En él participarán niños de edad y estado inicial de salud similares, pero solo a unos se les aplicará la dosis única de vacuna contra el sarampión establecida a los nueve meses; los otros recibirán una dosis adicional a una edad posterior.

Ambos investigadores también alegan que la reticencia ante sus ideas se basa más en cuestiones políticas y pragmáticas que en críticas científicas válidas. Aaby afirma que sus estudios incomodan a la política oficial porque muestran que las vacunas atenuadas deberían ser las que se administren en último lugar, lo que trastoca los actuales programas de vacunación y podría provocar inquietud en los padres acerca de la seguridad. Los expertos en salud pública «no quieren ni oír hablar de ello, y los comprendo», comenta Aaby.

Pero las ideas de Aaby y Benn pueden estar llegando a un punto de inflexión. En un informe de 2014, la OMS escribió que

los efectos inespecíficos de las vacunas parecen «plausibles y comunes» y que merecen más atención. Por ello, en abril de 2017 la agencia anunció que supervisaría el diseño de dos ensayos clínicos de varios años de duración para estudiar más a fondo la hipótesis, si bien todavía no han comenzado. Los investigadores, cuya relación profesional se ha convertido en una prolongada historia de amor, también están llevando adelante más ensayos, en uno de los cuales la madre de María decidió que su hija participara. Como constaté en el centro de salud, Balé tomó un sobre de gran tamaño que contenía docenas de sobres cerrados más pequeños, lo sostuvo abierto frente a ella y le dijo que extrajera uno, lo que garantizaba que su hija se asignaría al azar al grupo de tratamiento o al de control. Al abrir el sobre elegido, Balé le comunicó que a María se le administraría la dosis adicional de la vacuna y su madre sonrió esperanzada. Llevó a su hija a la sala anexa, donde una enfermera esperaba con una sonrisa amable sosteniendo una aguja.



CHRISTINE BENN Y PETER AABY sentados frente a su casa en Guinea-Bissau. Gran parte de su investigación sobre las vacunas la llevan a cabo en este país.

SOFIA BUSK HANSEN

LA PISTA DEL SARAMPIÓN

En 1979, poco después del lanzamiento de un proyecto de vigilancia sanitaria en Bissau, un joven Aaby vio cómo el sarampión terminaba con la vida de uno de cada cuatro bebés de la zona. Fue el año en que observó por primera vez un muerto, aunque después presenció muchos más.

Por aquel entonces, las vacunas infantiles no eran habituales en África. Según cálculos de la OMS, en 1980 solo un 6 por ciento de los niños recibió la primera dosis de la vacuna del sarampión con virus vivos, y a un 8 por ciento se les aplicó la primera vacuna inactivada contra la difteria, el tétanos y la tos ferina (DTP). No se trataba de una vacuna nueva, ya que estaba autorizada desde 1949, pero 31 años después, menos de uno de cada 12 niños africanos había recibido alguna vez una dosis. En realidad, por entonces solo se disponía de unas pocas vacunas infantiles en el continente. Además de la vacuna DTP y la del sarampión, existían otras dos a base de microbios vivos: una contra la tuberculosis (el bacilo de Calmette-Guérin, o BCG) y otra contra la poliomielitis. Ese mismo año, en EE.UU., al 86 por ciento de los niños se le administró la vacuna del sarampión, al 98 por ciento la DTP y al 95 por ciento la de la polio. Hoy en día, los niños africanos reciben muchas más vacunas que antes, pero todavía se sitúan tristemente muy por detrás de EE.UU.

En 1978, un año antes de que comenzara el histórico brote epidémico de sarampión, Aaby había llegado a Guinea-Bissau enviado por una organización sueca para investigar la desnutrición. Cuando la epidemia se extendió por la ciudad, manejó los hilos para importar la vacuna contra el sarampión y empezó a inocularla a los niños de la localidad y a anotar las tasas de infección y mortalidad. Este procedimiento era audaz, ya que en aquellos momentos las autoridades sanitarias pensaban que las campañas de vacunación contra el sarampión en África constituían en esencia un derroche de dinero y de esfuerzo. En un artículo publicado en 1981 en la revista *Lancet,* varios investigadores analizaron la supervivencia tras una campaña de vacunación contra el sarampión en Zaire y concluyeron que, en el futuro, «sería mejor pensárselo dos veces antes de adjudicar unos recursos ya escasos a un programa de ese tipo». Sostenían que el sarampión se cobraba la vida de los niños más débiles y, aunque la vacuna evitara la infección, los que se hubieran librado de ella morirían pronto por alguna otra causa.

Pero la experiencia de Aaby no respaldaba ese argumento. Las cifras que observó antes y después eran abrumadoras: en 1979, el primer año del brote, murieron un 13 por ciento de los niños de la localidad que tenían entre seis meses y tres años; en 1980, cuando se dispuso de la vacuna, solo fallecieron un 5 por ciento. Sorprendentemente, la mortalidad por causas diferentes al sarampión también se redujo en una quinta parte entre 1979 y 1980. Y la tendencia continuó. Incluso una vez desaparecido el sarampión, la probabilidad de que los niños inmunizados sobrevivieran a otras infecciones era mayor que la de sus congéneres no vacunados. «Fue uno de aquellos momentos en los que de golpe te das cuenta de algo que nunca hubieras creído posible», señala. Aaby y sus colaboradores escribieron una carta a la revista *Lancet* en la que refutaban la teoría de que las campañas de vacunación contra el sarampión en África fueran inútiles —esta fue su primera publicación en una revista médica. Afirma que, desde entonces, la vacuna contra el sarampión «le empezó a obsesionar».

Aaby ha publicado hasta ahora más de 100 estudios sobre esta vacuna. Su programa de vigilancia, el Proyecto de Salud Bandim, una colaboración entre el Ministerio de Sanidad de Guinea-Bissau y el Instituto Estatal del Suero de Dinamarca, es una de las razones. Durante más de 40 años, se han registrado en el proyecto todos los embarazos, nacimientos y muertes en el distrito urbano de Bandim en Bissau, así como en cinco regiones rurales próximas. El equipo de Aaby ha hecho un seguimiento de la salud de más de 500.000 habitantes de esas zonas y ha recogido datos sobre hospitalizaciones, vacunaciones y opciones sanitarias (por ejemplo, si las personas duermen con mosquitero). Un día durante mi visita, mientras paseaba con Aaby, una madre que portaba un bebé le dijo que lo recordaba de cuando la visitó siendo niña hacía unos treinta años. Sus colegas y ayudantes en el proyecto llamaban cariñosamente a Aaby *Homem Grande,* «Gran Hombre.»

Aaby siempre ha sido un poco un lobo solitario —muchos días trabaja solo en el despacho de su casa—, aunque lo ha sido menos en los últimos 15 años. Cuando en 1992 Benn es-

taba en la Facultad de Medicina en la Universidad de Aarhus, le aconsejaron que se pusiera en contacto con Aaby porque quería estudiar si los suplementos de vitamina A, que suele administrarse junto con la vacuna del sarampión en los países en desarrollo, interactuaban de alguna manera con la vacuna. «Todavía conservo el trozo de papel con su número», me explica Benn, que ahora tiene 50 años. Desde entonces trabaja con Aaby. Benn es ahora profesora de salud global en la Universidad del Sur de Dinamarca y dirige el grupo danés del Proyecto de Salud Bandim. Es una científica prolífica, que ha publicado más de 200 artículos sobre temas como los efectos inespecíficos de las vacunas y el impacto de los suplementos de vitamina A en los niños de países en desarrollo. Su hogar está en Dinamarca pero pasa alrededor de dos meses y medio al año en Guinea-Bissau. Los dos investigadores aportan al terreno y a su relación personalidades complementarias: Benn es vital y filosófica y Aaby es serio y meticuloso.

En su mayor parte, el trabajo de Aaby y Benn sobre la vacuna contra el sarampión ha confirmado las primeras observaciones de Aaby. En un artículo de referencia publicado en 1995 en el *BMJ*, analizaban los datos de 12 estudios publicados con anterioridad (algunos eran de ellos mismos) sobre la relación entre la vacunación contra el sarampión y la mortalidad en países en desarrollo. Se percataron de que la vacuna reducía entre un 30 y un 86 por ciento el riesgo global de muerte. En todos los estudios, el sarampión en sí mismo solo mató a una pequeña proporción de los niños no vacunados, por lo que la vacuna no solo evitaba el sarampión; algo más estaba sucediendo. En un artículo de 2014 publicado en *Journal of the American Medical Association* (*JAMA),* Aaby y Benn colaboraron con investigadores daneses para estudiar si estos efectos protectores también se producían en países con recursos elevados. Observaron que, en los niños daneses que recibieron la vacuna atenuada contra el sarampión-paperas-rubeola como última inoculación, la probabilidad de hospitalización por cualquier tipo de infección fue un 14 por ciento inferior a la de los niños que recibieron en último lugar la vacuna inactivada DTaP-IPV-Hib contra la difteria, el tétanos, la tos ferina acelular, la poliomielitis y la infección por *Hemophilus influenzae* de tipo B. Este estudio inspiró los análisis que en 2017 llevaron a cabo los CDC, en los que se observó que las vacunas atenuadas producían una protección aún mayor en EE.UU.

Aaby y Benn han relacionado también la vacuna BCG con una menor mortalidad neonatal, y han estudiado asimismo la vacuna atenuada oral contra la polio. En un artículo de 2018, comunicaron que la mortalidad infantil había disminuido un 19 por ciento tras las campañas con esta vacuna; y en un ensayo clínico publicado en 2015, observaron que la vacuna de la polio administrada junto con la BCG en los dos días posteriores al nacimiento reducía la mortalidad en un 42 por ciento, en comparación con la BCG sola. Teniendo en cuenta en parte sus hallazgos, 15 científicos remitieron en 2016 una carta a la revista *Lancet* en la que sostenían que la sustitución de la forma atenuada por la inactivada de la vacuna contra la polio, propuesta que forma parte de un plan desarrollado por la Iniciativa de Erradicación Mundial de la Poliomielitis, podría aumentar sin proponérselo la mortalidad infantil.

Los dos científicos están convencidos de que las pruebas que han reunido apuntan a una conclusión clara: las vacunas ejercen efectos sobre el organismo más intensos de lo que se pensaba. El gran misterio con el que se han enfrentado es cómo se producen estos.

UN IMPULSO IMPORTANTE

Mihai G. Netea podría ofrecer una respuesta al enigma. En 2010, este inmunólogo de la Universidad de Radboud se embarcó en un estudio que de hecho no pensaba que fuera a resultar tan interesante. En su laboratorio investigaba cómo afectaba la vacuna BCG a las células inmunitarias humanas, esto es, cómo las enseñaba a reconocer y atacar a la bacteria *Mycobacterium tuberculosis.* Para proporcionar un control experimental en un análisis, el personal de laboratorio expuso muestras de sangre de voluntarios vacunados a *Candida albicans* (una levadura frecuente). Según la doctrina inmunológica aceptada, que sostiene que las vacunas estimulan respuestas inmunitarias específicas contra un patógeno, la BCG no debería desencadenar respuesta alguna frente a *Candida*.

Unas semanas después, Netea recuerda que la estudiante que realizaba la prueba se le acercó preocupada. «Creo que hice algo mal porque veo diferencias tanto en la tuberculosis como en *Candida*.» Era posible que las muestras de sangre se hubieran contaminado y le sugirió que recogiera otras nuevas y repitiera el experimento. Así lo hizo, pero sucedió lo mismo. Estaba desconcertado. Empezó a leer acerca de la BCG y dio con algunos estudios sorprendentes que sugerían que la vacuna también protegía a ciertos animales contra la malaria, la gripe y *Listeria monocytogenes,* una causa frecuente de toxinfección alimentaria.

En ese momento el estudio de Netea se transformó en un canto de sirena, una circunstancia que reclamaba toda su atención. ¿Cómo podía una vacuna contra la tuberculosis modificar la respuesta del organismo frente a otros patógenos? La idea contradecía los paradigmas establecidos. Las vacunas preparan al organismo para que sintetice unas proteínas llamadas anticuerpos que reconocen, se unen y atacan a las proteínas situadas en la superficie de los patógenos, si el organismo entra de nuevo en contacto con ellos en algún momento. Esta defensa es lo que se conoce como inmunidad adquirida, o adaptativa, y actúa como un equipo de francotiradores que solo aniquilan ciertos blancos. Debido a su especificidad, para Netea no tenía sentido que la inmunidad adquirida fuera responsable de la capacidad de la BCG para proteger contra diversas agresiones.

Otro tipo de defensa del organismo, que históricamente se había pensado que no intervenía en las vacunas, es la denominada inmunidad innata, una suerte de batallón llamado a abrir fuego rápido contra cualquier nuevo invasor. Cuando los patógenos invaden, las células inflamatorias innatas son atraídas al lugar de la infección. Un tipo de leucocitos de gran tamaño, los denominados fagocitos (entre ellos los macrófagos), engullen y destruyen a los patógenos. También segregan unas sustancias, las citocinas, que convocan a otras células inmunitarias. La reacción produce proteínas que marcan a los patógenos para que los fagocitos los localicen con mayor facilidad.

Como la BCG aumentaba la protección frente a múltiples patógenos, Netea pensó que quizás estuviera interviniendo el sistema inmunitario innato. Pero, según el conocimiento tradicional, este no «recordaría» los encuentros anteriores, como el provocado por vacunas previas. Desde hace tiempo se piensa que las células inmunitarias innatas atacan a todo lo que ven y luego se olvidan de la batalla, como un soldado con amnesia. Sin embargo, se ha demostrado que no es así.

En un artículo publicado en 2012 en los *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* (*PNAS*), el equipo de Netea observó que las células inmunitarias humanas activadas previamente por acción de la BCG, cuando más tarde se exponen a otros patógenos, producen una cantidad cuatro veces mayor

EFECTOS DE LAS VACUNAS ATENUADAS

Defensa redoblada

El sistema inmunitario tiene dos componentes: uno adquirido y otro innato. El adquirido produce células que solo responden a bacterias u otras amenazas específicas. El innato tiene una respuesta más rápida, pero su eficacia contra un determinado patógeno es más limitada. Una nueva teoría sostiene que las vacunas con patógenos vivos pero atenuados «adiestran» a la inmunidad innata para que sea más potente frente a una serie de microorganismos.

Primera infección

Segunda infección

Inmunidad adquirida

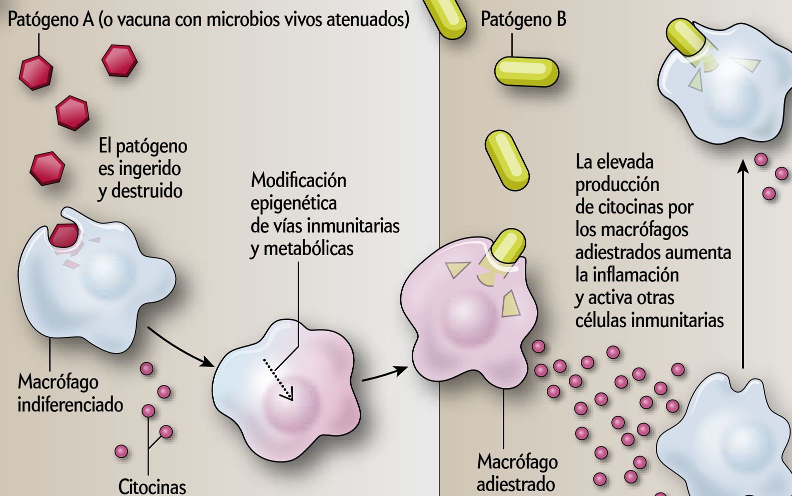
Comienza su acción con la captura de fragmentos de un patógeno invasor, los antígenos. Las células presentan estos antígenos (con frecuencia proteínas de bacterias o virus) a los linfocitos T indiferenciados, que quedan así activados. Las células utilizan, pues, a los antígenos para desencadenar una reacción inmunitaria específica frente al invasor. En ella intervienen linfocitos T citotóxicos que persiguen a las células infectadas, y mensajeros químicos denominados citocinas que activan otras respuestas destructoras. Además, se generan linfocitos T de memoria que permanecen en el organismo y, si se produce una nueva infección del mismo patógeno, lo identifican y lo destruyen.

Patógeno A
Célula huésped
La célula huésped infectada por el patógeno es destruida
Célula dendrítica presentadora de antígenos
Linfocito T citotóxico
Antígeno (fragmento del patógeno A)
Linfocito T indiferenciado
Linfocitos T activados
Citocinas (proteínas de señalización)
Linfocitos T de memoria

Patógeno A
Los linfocitos T de memoria facilitan una respuesta más eficaz de los linfocitos T citotóxicos
Linfocito T citotóxico
Linfocito T de memoria
Linfocitos T activados
Linfocitos T de memoria

Inmunidad innata

Utiliza las células generales de defensa denominadas macrófagos, que engullen de forma inespecífica a cualquier patógeno. No obstante, estudios recientes insinúan que el componente innato, igual que el adquirido, puede recordar encuentros anteriores con el patógeno. Durante estos, que pueden ser con un patógeno de una vacuna atenuada, se marcan «epigenéticamente» los macrófagos: la configuración de su ADN se modifica y se transmite a las células hijas. Estos cambios incrementan la respuesta inmunitaria a varios patógenos, no solo a uno de ellos, y modifican el metabolismo de los macrófagos, que se vuelven más activos. Si se produce el ataque de un patógeno distinto, las células sintetizan más citocinas, las cuales desencadenan la inflamación y otros procesos orgánicos que causan daños a los invasores.



FUENTES: «TRAINED IMMUNITY: A PROGRAM OF INNAT IMMUNE MEMORY IN HEALTH AND DISEASE», MIHAI G. NETEA ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 352, ABRIL DE 2016. «INNAT IMMUNE MEMORY: A PARADIGM SHIFT IN UNDERSTANDING HOST DEFENSE», MIHAI G. NETEA ET AL. EN *NATURE IMMUNOLOGY*, VOL. 16, JULIO DE 2015; JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

de una citocina clave denominada IFN-gamma (IFN-γ) y una cantidad dos veces mayor de las citocinas TNF e interleucina-1 beta (IL-1ß). Las células pueden iniciar esta mayor respuesta durante un lapso de tres meses después de la vacunación, lo que sugiere que el sistema inmunitario innato puede, de hecho, recordar lo que aprende. Hace menos, en 2018, los investigadores comunicaron que la BCG reprograma las células inmunitarias humanas de modo que las ayuda a prevenir la fiebre amarilla.

Netea «ha sido pionero en un nuevo campo dentro de la inmunología innata», afirma Helen Goodridge, inmunóloga en el Centro Médico Cedars-Sinai de Los Ángeles. Los estudios realizados en otros laboratorios también avalan esta teoría al demostrar que la vacuna contra el sarampión estimula la respuesta inmunitaria del organismo frente a la toxina producida por las bacterias del tétanos, así como frente a *Candida*.

No está claro cómo ejerce su efecto de amplio espectro la vacuna contra el sarampión, pero el trabajo de Netea hace pensar que la BCG adiestra al sistema inmunitario innato introduciendo cambios en el metabolismo celular y modulando la expresión de genes inmunitarios claves. Cuando a un individuo se le administra la BCG, se añaden unas pequeñas señales moleculares en genes importantes relacionados con la inmunidad; más tarde, esas marcas identificarán a esos genes para que se activen con rapidez frente al ataque de otro patógeno. ¿Por qué una vacuna atenuada produciría mejor estos efectos que una inactivada? Los investigadores suponen que los microorganis-



UN RECIÉN NACIDO es vacunado contra la tuberculosis en un hospital de Guinea-Bissau. Algunos estudios indican que la inoculación protege contra muchas enfermedades.

MELINDA WENNER MOYER

mos vivos pueden estimular una reacción distinta por la sencilla razón de que están vivos, y no son tan solo fragmentos o partes de un microorganismo, como en las vacunas inactivadas. (Las infecciones reales completas, como el sarampión, no producen al parecer estos efectos favorables; de hecho, pueden inhibir la inmunidad.)

Cuando estaba finalizando su estudio de 2012 en *PNAS,* Netea se topó con un ensayo que Aaby y Benn acababan de publicar y que hacía pensar que la BCG reducía la mortalidad neonatal global, hallazgo que fue criticado como imposible desde un punto de vista biológico. Netea, entusiasmado, escribió a Aaby para comunicarle que acababa de descubrir un mecanismo que podía explicar sus observaciones. A partir de entonces, estos dos investigadores y Benn han trabajado juntos para dilucidar los procesos biológicos que sustentan los datos de Guinea-Bissau. Al parecer, las vacunas «modifican el sistema inmunitario y no solo lo transforman en el modo adquirido, específico del patógeno», afirma Tobias Kollmann, inmunólogo y especialista en enfermedades infecciosas de la Universidad de la Columbia Británica, quien en ocasiones colabora con Aaby, Benn y Netea. «Lo modifica según vías muy diferentes.»

JUICIO A LAS INVESTIGACIONES

Neal Halsey admite que Aaby ha realizado importantes contribuciones a la investigación de las vacunas a lo largo de su carrera, pero apunta que su trabajo sobre los efectos inespecíficos no es una de ellas. Halsey, exdirector del Instituto para la Seguridad de las Vacunas de la Universidad Johns Hopkins, va mucho más atrás en la trayectoria del científico danés. Recuerda que en la década de 1980, Aaby fue el primero en identificar un posible problema de seguridad con una nueva vacuna contra el sarampión, más concentrada, introducida en Guinea-Bissau y otros países en vías de desarrollo. En un primer momento, nadie le creyó (lo que parece ser una cuestión recurrente para Aaby), pero más tarde Halsey revisó los datos que había recogido en Haití y observó los mismos efectos. Basándose en gran medida en sus hallazgos, la OMS retiró la vacuna del mercado en 1992.

Pero en la actualidad Halsey cree que Aaby pone sus convicciones por delante de la ciencia. En el Congreso Mundial sobre Vacunas, celebrado en 2018 en Washington D.C., Halsey reconoció que los datos de Guinea-Bissau tal vez fueran reales, pero, según él, Aaby y Benn habían extraído de ellos conclusiones improcedentes. Los niños que reciben la vacuna en el momento adecuado suelen ser bastante diferentes de los que no la reciben: suelen estar más sanos o tener padres más sanos y con medios suficientes para llevarlos al médico y cuidarlos mejor en general. Según Halsey, la conclusión de que las vacunas son responsables de unos resultados médicos tan diferentes peca de exagerada.

Un estudio de 2017 realizado en los Países Bajos, publicado en el *BMJ*, ilustra este punto. Los autores analizaron la frecuencia de hospitalización en niños de corta edad que habían recibido una vacuna atenuada al final de una serie de inmunizaciones, y la compararon con la de niños que recibieron solo vacunas inactivadas. Constataron que la hospitalización por infecciones en los primeros era un 38 por ciento inferior a la de los segundos, y la causada por heridas o intoxicaciones también era un 16 por ciento inferior. Las vacunas no modifican el riesgo de accidentes, por lo que el hecho de que los investigadores observaran esta relación subraya la idea de que el historial de vacunación depende de otros factores en la vida de un individuo. No obstante, admiten que el modo de administración de las vacunas en los Países Bajos (donde la programación se realiza con antelación y los padres, por regla general, solo cancelan la visita por enfermedad del niño) podría exagerar el denominado efecto del «vacunado saludable», mientras que los datos de otros países pueden no experimentar un sesgo tan pronunciado.

Como resulta muy difícil interpretar la causalidad en los estudios de observación, Halsey y otros consideran necesario que Aaby y Benn realicen más ensayos comparativos y aleatorizados para esclarecer los efectos de una intervención. En este tipo de estudios, los niños se seleccionan al azar para que reciban la vacuna o un placebo, y se les hace un seguimiento a lo largo del tiempo. La asignación aleatoria elimina la posibilidad de que el estatus socioeconómico o el estado de salud global influyan en la decisión sobre la vacunación. El problema es que las autoridades sanitarias ya recomiendan las vacunas en todo el mundo, por lo que no resulta ético que los investigadores nieguen la vacunación a niños con el fin de estudiarlos. Por consiguiente, los científicos deben ser creativos. Por ejemplo, pueden diseñar ensayos que proporcionen a los niños vacunas adicionales o tempranas, o aprovechar un retraso natural en la recepción de la vacuna.

Realizar un ensayo clínico en Guinea-Bissau entraña enormes dificultades. Aaby y Benn han de conservar las vacunas en la nevera de su casa, donde disponen de un generador, porque la red eléctrica es muy voluble. La inestabilidad política es otro de los problemas: el intento de uno de los ensayos fue abortado por la devastadora guerra civil de 1998, en la que Aaby también sufrió una herida que podría haber sido mortal. Una parte de la población de Bissau solo habla dialectos minoritarios, lo que dificulta la comunicación, y muchas personas no disponen de teléfono.

A pesar de estos problemas, Aaby y Benn intentan llevar a cabo ensayos aleatorizados, como el que se le propuso a María. Los primeros resultados no siempre han confirmado sus hallazgos previos. En un ensayo de 2018, observaron que la probabilidad de hospitalización o muerte de los bebés a los que se les aplicó la vacuna del sarampión recomendada a los nueve meses,

más una dosis adicional de la misma vacuna entre los cuatro y cuatro meses y medio, no fue inferior que en los bebés que no recibieron la dosis extra. No obstante, ambos siguen convencidos de que los efectos de la vacuna son reales, aunque no se comprendan del todo. Pero a Halsey le parece preocupante su obstinada persistencia, y afirma: «Los buenos científicos aceptan que una de sus observaciones iniciales pueda no ser cierta».

Aaby y Benn son impopulares por otra razón: han publicado estudios que indican que las vacunas inactivadas, como la DTP, tienen efectos perjudiciales, en especial para las niñas. Aunque estas vacunas protejan contra las enfermedades a las que se dirigen, Aaby y Benn las han relacionado con un mayor riesgo de otras enfermedades infecciosas. No está claro por qué sucedería así —tal vez la exposición a microbios muertos aumente la tolerancia del sistema inmunitario frente a otros futuros intrusos—, y los críticos defienden que la asociación no solo es falsa, sino también peligrosa, porque podría disminuir aún más la confianza de la población en las vacunas. Aaby admite que «algunas de estas voces críticas solo piensan que soy un loco que causa problemas».

EN ARAS DE LA CLARIDAD

Pero sus batallas están entrando en una nueva fase. Aunque comenta que se le están terminando los fondos para su investigación, la OMS afirma que pronto realizará una intervención. Aaby contactó por primera vez con la agencia en 1997 para informar sobre sus hallazgos. En 2013, la OMS creó un equipo de trabajo para revisar los datos; en 2014 advirtió que la cuestión requería más atención; y en 2016 y 2017 debatió sobre los planes para supervisar otros ensayos. En uno de ellos se investigarían los efectos sobre la mortalidad infantil de administrar al nacer la BCG, en comparación con un placebo. En otro, se evaluarían los efectos de una dosis adicional de vacuna contra el sarampión administrada junto con la DTP entre los 12 y los 16 meses de edad.

Sin embargo, a Aaby y otros les preocupa que estos ensayos no aporten suficiente claridad. Se administrarán a los sujetos vacunas inactivadas al mismo tiempo que las atenuadas o después de estas, lo que, según hallazgos previos de Aaby, podría silenciar los posibles efectos beneficiosos. Kollmann apunta: «Hemos discutido largo y tendido esta cuestión con muchos expertos, y se tiene claro que estos ensayos no ofrecerán la respuesta». El pediatra Shann coincide con esta opinión. Según él, estos ensayos representarán «un gasto excesivo de tiempo y de dinero», porque «ninguno de los implicados comprende a ciencia cierta el terreno». Además, no se sabe aún cuándo comenzarán. Tarik Jasarevic, portavoz de la OMS, afirma que a principios de 2019 la agencia no había hallado patrocinio económico para ellos.

Por último, a Aaby le preocupa que la OMS justo ahora esté examinando las propuestas. Sospecha que la agencia quiere aparentar que está realizando las diligencias oportunas tras su informe de 2014 sobre los efectos inespecíficos de las vacunas, pero que su propósito es en realidad abandonar la cuestión. Si los efectos inespecíficos son reales y tienen la fuerza suficiente para salvar vidas, las agencias de salud pública tendrán que pensar en hacer cambios en el programa de inmunizaciones y tal vez incluso sustituir algunas vacunas inactivadas por otras atenuadas, lo que resultaría en extremo difícil.

El año pasado le pregunté a Frank DeStefano, director de la Oficina de la Seguridad de las Vacunas de los CDC, qué medidas habría que tomar para hacer estos cambios en EE.UU., a lo que me respondió que la demostración de su eficacia debería ser más sólida. Me indicó que la agencia no tenía previsto en aquel momento recoger más datos sobre el tema, y añadió que, aunque se dispusiera de pruebas adicionales, los CDC deberían tener en cuenta todos los posibles riesgos y beneficios antes de realizar cambios en su política de actuación.

La tarde que me fui de Guinea-Bissau me hallaba comiendo con Benn en el jardín de su casa y pensaba sobre la filosofía científica de la pareja. Ambos se mantienen firmes en sus convicciones. Creen que los efectos inespecíficos son reales pero tan complejos que muchos detalles siguen escapándoseles, algo que no les asusta reconocer. Para los críticos, esta fuerza de convicción demuestra una gran debilidad, es una idea preconcebida que sesga sus resultados. Y tal vez sea así. Pero el sesgo no es una exclusiva de ellos. Los científicos son personas, con sus ideas, prejuicios y sentimientos, y todos los estudios implican una interpretación. ¿Cómo saber cuál de ellas está más cerca de la verdad? ¿Los que admiten sus creencias están más equivocados que los que no las aceptan? ¿Quién debería decidir cuándo se dispone de pruebas suficientes para llegar a un consenso, en especial cuando las implicaciones son inesperadas, incómodas e importantes? Al menos, en este campo pequeño y polémico no existen respuestas claras.

Benn me comentó: «Uno tiene la sensación de que está tirando de un hilo sin conocer el tamaño del ovillo». Se refería a la investigación sobre las vacunas, pero podría hablar del propio proceso científico. La biología es muy complicada porque nuestro organismo es complejo. La práctica científica también lo es porque es producto de la humanidad, es un empeño surgido y conformado por nuestras mentes imperfectas. Si las vacunas están dotadas del efecto que Aaby y Benn creen que tienen, una cuestión que todavía sigue abierta, harán falta muchos más esfuerzos para desenredar el enigma. IyC

PARA SABER MÁS

Vaccine programmes must consider their effect on general resistance. Peter Aaby et al. en *BMJ*, vol. 344, n.º e3769, junio de 2012.

The introduction of diphtheria-tetanus-pertussis and oral polio vaccine among young infants in an urban African community: A natural experiment. Søren Wengel Mogensen et al. en *EBiomedicine*, vol. 17, págs. 192-198, marzo de 2017.

Trained immunity: An ancient way of remembering. Mihai G. Netea y Jos W. M. van der Meer en *Cell Host & Microbe*, vol. 21, n.º 3, págs. 297-300, marzo de 2017.

BCG vaccination protects against experimental viral infection in humans through the induction of cytokines associated with trained immunity. Rob J. W. Arts et al. en *Cell Host & Microbe*, vol. 23, n.º 1, págs. 89-100, enero de 2018.



NEUROCIENCIA

Los otros efectos de la cirugía bariátrica

Nuevos estudios revelan que la intervención quirúrgica modifica la microbiota intestinal y las conexiones enterocerebrales. Ello abre nuevos caminos para el tratamiento de la obesidad

Bret Stetka

Ilustración de Bomboland



Bret Stetka es escritor y director editorial de Medscape (filial de la web de información médica WebMD). Se graduó en la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia en 2005.

El primer plato de huevos revueltos fue una experiencia extraordinaria para Teresa.

Coordinadora de enfermería del Centro Médico de la Universidad Stanford, con 41 años entonces, en los días posteriores a la operación había perdido por completo el apetito. Únicamente tomaba líquidos, y solo por orden del cirujano. Pero cuando recuperó el interés por la comida, su relación con los alimentos había cambiado de modo radical.

La primera comida sólida de Teresa después de cuatro semanas fue toda una revelación: unos sencillos, tiernos y cremosos huevos. Para su sorpresa, quedó enteramente satisfecha, desaparecido el deseo de golosinas y platos muy sazonados. Ya no le apetecían las patatas fritas ni los postres suculentos que tanto le habían gustado. Había recuperado el apetito, pero por primera vez en su vida le resultaba fácil comer «bien».

En 2012 se le practicó una gastrectomía tubular, una de las técnicas quirúrgicas bariátricas que modifican el estómago y el intestino para favorecer el adelgazamiento. Pero más que la pérdida de peso, sin duda notoria, el resultado más inesperado fue la transformación completa de su apetito.

A vueltas con el sobrepeso desde la infancia, los años de tratamiento hormonal para quedarse embarazada no ayudaron; tampoco el embarazo. «Sin apenas darme cuenta, pesaba más de 120 kilos», recuerda. «Y era incapaz de adelgazar pese a probarlo todo: dietas de todo tipo, mucho ejercicio.» El exceso de peso le dificultaba atender al niño. «No podía mantener el ritmo de mi hijo», asegura.

La gastrectomía tubular reduce el estómago desde el tamaño de un balón de rugby hasta el de un plátano, en torno a un 15 por ciento de sus dimensiones originales. Al cabo de un año, tras meses de ingesta moderada y más saludable, Teresa pesaba 68 kilogramos. «Ese peso era hasta bajo para mí», refiere, «y es que la operación dio un vuelco a mi forma de comer».

Desde su introducción en los años sesenta del siglo pasado, estas técnicas se han considerado una solución eminentemente mecánica: un estómago pequeño alberga y digiere menos comida. El paciente se sacia antes, come menos y, por tanto, adelgaza.

Pero esta idea es cierta solo en parte. La realidad no es tan sencilla. Lo más probable es que el adelgazamiento de nuestra protagonista obedeciera a un cambio radical en la comunicación recíproca entre el tubo digestivo y el encéfalo. La intervención generó indirectamente nuevas conexiones neuronales, que modificaron su actitud hacia la comida y sus ansias de comer.

Según estudios recientes, el apetito, el metabolismo y el peso se regulan a través de un complejo diálogo entre el intestino y el cerebro, en el que los factores mecánicos, las hormonas, los ácidos biliares e incluso los microbios entéricos interactúan con neurocircuitos laberínticos. Al parecer, la cirugía bariátrica afecta a todos esos sistemas y los modifica. Para comprobarlo, se están trazando los complicados vínculos que controlan nuestro comportamiento alimentario, nuestro apetito y esa frenética búsqueda de calorías que emprendemos cuando sentimos hambre. De igual modo, podría revelar nuevos objetivos terapéuticos, como la microbiota o quizás el propio cerebro, que dejen obsoleta la arriesgada intervención quirúrgica.

EN SÍNTESIS

Hace tiempo que se atribuye la eficacia adelgazante de la cirugía bariátrica a la reducción del estómago, pero nuevos estudios indican que también influyen otros mecanismos.

Las áreas cerebrales que participan en la comunicación con el intestino se vuelven hiperactivas en el paciente operado.

La microbiota digestiva queda modificada de tal modo que podría reconfigurarse la transmisión de señales a lo largo del eje enterocerebral, propiciando nuevos hábitos alimentarios más saludables.

ENCUENTRO DEL CEREBRO Y EL INTESTINO

Todos hemos sentido los efectos físicos de la comunión entre el aparato digestivo y el cerebro: las mariposas en el estómago que desata el amor o el nudo de ansiedad antes de pronunciar un discurso. Estas manifestaciones obedecen a los mensajes que

envía el encéfalo al canal alimentario por medio de hormonas y señales neuronales. De hecho, la comunicación es recíproca, pues el intestino también manda señales al encéfalo. El abdomen alberga el sistema nervioso entérico, que en términos coloquiales se puede considerar un segundo cerebro. Esta red contribuye a controlar la digestión y la propulsión de los alimentos a lo largo de los 9 metros del tubo gastrointestinal. Igual que muchos otros órganos importantes, se comunica directamente con el encéfalo a través del nervio vago.

Dos grandes vías enterocerebrales regulan el apetito. En ambas interviene el hipotálamo, una pequeña región en el centro del encéfalo encargada de producir hormonas implicadas en el control de numerosos procesos corporales. El primer sistema actúa en ayunas. El estómago segrega grelina, una hormona que estimula el núcleo arcuato del hipotálamo. Este libera entonces neuropéptido Y, un neurotransmisor que, a su vez, estimula los centros del apetito de la corteza cerebral (los pliegues externos o circunvoluciones del encéfalo), lo que nos impele a buscar alimento. Anticipando la hora de comer, el cerebro envía una señal al estómago a través del nervio vago, que lo prepara para la digestión. «Basta con la simple vista o el olor de los platos o con pensar en ellos. El cerebro prepara el cuerpo para la ingesta», explica Andrés Acosta Cárdenas, gastroenterólogo de la Clínica Mayo y experto en obesidad.

La segunda vía enterocerebral suprime el apetito. A medida que comemos, el tejido adiposo, el páncreas y el tubo gastrointestinal segregan otras hormonas, como la leptina y la insulina, que, por separado, desempeñan diversas funciones en la digestión y el metabolismo. Cuando actúan juntas, informan a otra zona del hipotálamo de que nos estamos llenando y el cerebro nos insta a dejar de comer.

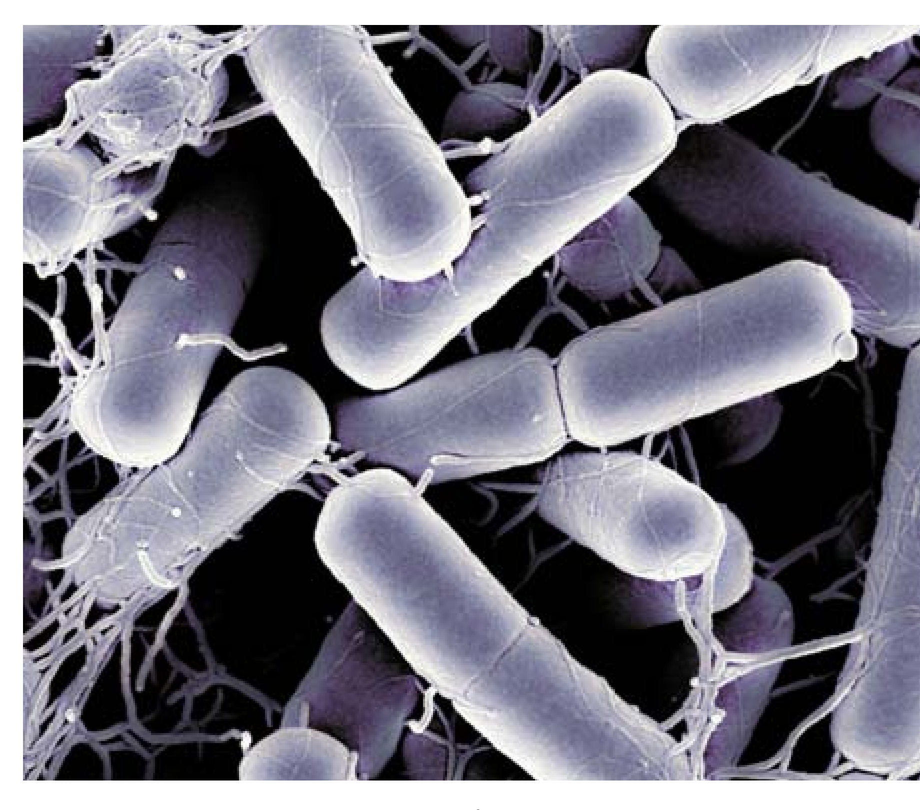
El apetito y la saciedad se suceden en un ciclo continuo. Pero las vías del hambre interactúan también con otras regiones cerebrales, como la amígdala, que interviene en las emociones, y el hipocampo, el centro de la memoria. Así, nuestros «sentimientos viscerales» y «comidas reconfortantes» dependen más del estado de ánimo y de los recuerdos nostálgicos de la tarta de la abuela que de la hora de comer. A consecuencia de los procesos mentales superiores, la comida tiene ahora un contexto. Es cultura. Como lo expresaba el dramaturgo George Bernard Shaw: «no hay amor más sincero que el amor por la comida».

Se suma, además, el goce hedonista de sentarse a la mesa. Comer estimula los circuitos de recompensa, lo que incita a tomar alimentos por placer, aun cuando las necesidades energéticas estén cubiertas. Muchos atribuyen a esta rama del eje enterocerebral un papel en la obesidad.

Los estudios de neuroimagen confirman que, a semejanza del sexo, las drogas y el juego, la comida desencadena la liberación de un pico de dopamina en los circuitos cerebrales de recompensa. Este neurotransmisor actúa como un potente motivador, capaz de reforzar la ingesta por el puro gusto de comer, no por subsistencia. Se ha descubierto que, para la rata, el dulzor es más deseable que la cocaína. En las personas, la psiquiatra Nora Volkow, directora del Instituto Nacional de Drogadicción de Estados Unidos, ha confirmado algo que todo buen amante del chocolate sabe: los efectos de los alimentos sobre el sistema de recompensa llegan a rebasar la saciedad e inducen a seguir comiendo. Tales hallazgos apuntan a un solapamiento neurobiológico entre la adicción y el comer en exceso, si bien es discutible que pueda ser una adicción genuina [*véase la entrevista con Nora Volkow* «El cerebro y la comida», por Kristin Leutwyler Ozelli; Investigación y ciencia, noviembre de 2007].

LA SOLUCIÓN QUIRÚRGICA

Gracias a la circulación de las hormonas mensajeras y de los neurotransmisores, la mente y el estómago permanecen en comunicación constante. De ahí que la alteración de esa interconexión tenga consecuencias, como sucede inevitablemente en las intervenciones bariátricas.



LOS MICROBIOS INTESTINALES podrían ser un factor importante en la obesidad. Las poblaciones que residen en el aparato digestivo cambian de forma persistente tras la derivación gástrica quirúrgica.

SCIENCE SOURCE

Se ha comprobado que en los días y semanas siguientes a la operación, los alimentos muy dulces, grasos y salados resultan menos apetecibles (como descubrió Teresa). Hans-Rudolf Berthoud, neurobiólogo de la Universidad Estatal de Luisiana, observó en un estudio publicado en 2010 que las ratas sometidas a una derivación gástrica dejaban de preferir una dieta rica en grasas. Veinte años antes, diversos equipos de investigación ya habían publicado que el deseo de ingerir alimentos dulces y salados solía desaparecer tras ese tipo de intervenciones. Más tarde, en 2012, un estudio de la Universidad Brown reveló que la apetencia por los dulces y la comida rápida disminuía notablemente después de las operaciones bariátricas en los adultos. Otro estudio de 2015 obtuvo resultados equiparables en adolescentes.

La modificación del apetito y del sentido del gusto podría obedecer a cambios en la liberación y la recepción de los neu-



EL USO DE BANDAS GÁSTRICAS (*imagen*) y otras técnicas de cirugía bariátrica podrían quedar obsoletas en la lucha contra el sobrepeso y la obesidad. Las nuevas estrategias terapéuticas se centrarían en el eje enterocerebral.

«La obesidad es un trastorno del eje enterocerebral. Debemos averiguar qué parte del eje está alterada en cada paciente para personalizar el tratamiento.»
—Andrés Acosta Cárdenas, Clínica Mayo

rotransmisores en el sistema enterocerebral. En 2016, Berthoud y sus colaboradores descubrieron que la cirugía bariátrica en ratones causaba, unos 10 días después, mayor actividad neuronal inducida por la ingesta en regiones del encéfalo que se comunican con el intestino. En concreto, el aumento de actividad tuvo lugar en una conexión entre neuronas del tronco encefálico que reciben estímulos sensitivos del estómago y el núcleo parabraquial lateral, parte del sistema de recompensa, así como en la amígdala.

Richard Palmiter, bioquímico de la Universidad de Washington, es experto en este campo. En 2013, su grupo publicó en *Nature* cómo se sirvió de complejas técnicas genéticas y de estimulación celular, como la optogenética (método que permite controlar tejido vivo mediante la luz), para activar o silenciar ciertas neuronas de la vía del núcleo parabraquial en el tronco encefálico del ratón. Averiguaron así que la estimulación de ese circuito reducía notablemente la ingesta. En cambio, si se desactivaba, el cerebro permanecía insensible al cóctel de hormonas que activa la saciedad, de modo que el animal seguía comiendo.

El trabajo de Palmiter indica que la activación de la vía parabraquial del tronco refrena el apetito. Como es la misma vía que deviene anormalmente activa en el posoperatorio, es probable que la hiperactivación descubierta por Berthoud forme parte de los intentos del eje enterocerebral por evaluar la satisfacción después de la intervención. Según sostiene, «el cerebro vuelve a aprender a quedar satisfecho con raciones menores».

En otras palabras, la cirugía bariátrica comporta sin duda un cambio mecánico: el cuerpo tiene que adaptarse a la reducción de espacio. Pero no acaba todo ahí. Tras la operación es posible que el intestino reciba más alimentos sin digerir, lo que, como conjetura Berthoud, desencadenaría una respuesta hormonal que alertaría al cerebro de que modere la ingesta. Este proceso modificaría la actividad cerebral en respuesta a la comida. Si está en lo cierto, el éxito de la intervención, por lo menos a corto plazo, dependería tanto de sus efectos sobre el eje enterocerebral como sobre el tamaño del estómago.

LA MENTE MICROBIANA

En la compleja comunicación que mente e intestino entablan, asoma otro actor que podría explicar los efectos de la cirugía bariátrica. La microbiota (los billones de organismos unicelulares que colonizan el aparato digestivo) ha sido involucrada en un sinnúmero de trastornos, muchos de los cuales afectan al encéfalo. Se cree que estos habitantes del cuerpo y su genoma (microbioma) intervienen en el autismo, la esclerosis múltiple, la depresión y la esquizofrenia mediante su comunicación con el cerebro, ya sea de forma indirecta por medio de las hormonas y el sistema inmunitario, o de forma directa a través del nervio vago.

Según el gastroenterólogo Lee Kaplan, director del Centro Weight del Hospital General de Massachusetts, la microbiota podría intervenir en la obesidad. En un estudio publicado en 2013 en *Science Translational Medicine*, su equipo transfirió la microbiota intestinal de ratones sometidos a derivación gástrica a otros no operados. Si bien el peso disminuyó casi un 30 por ciento en el grupo quirúrgico, los animales trasplantados perdieron un significativo 5 por ciento. (Entre tanto, un grupo de control sin intervención no presentó variaciones relevantes.) Que en los roedores no operados que recibieron microbios de sus congéneres operados se apreciara una reducción del peso hace pensar que estas poblaciones microbianas podrían ser en parte las responsables de la eficacia de las intervenciones bariátricas.

Otro estudio similar publicado en 2015 por Fredrik Bäckhed, biólogo de la Universidad de Gotemburgo, reveló que dos técnicas bariátricas, la derivación gástrica en Y de Roux y la gastroplastia vertical con banda, daban lugar a modificaciones duraderas de la microbiota entérica humana. Estas pudieron deberse a diversos factores, tales como el cambio de hábitos alimentarios a raíz de la intervención, los niveles de acidez en el tubo digestivo y la afluencia de alimentos sin digerir y de bilis (el líquido verde oliva segregado por el hígado que facilita la digestión) en zonas intestinales más lejanas a causa de la derivación.



En esa misma investigación, Bäckhed y sus colaboradores administraron a los ratones muestras de microbiota procedentes de pacientes obesos, tanto intervenidos como no. La grasa corporal aumentó en cierto grado en todos, pero el incremento fue un 43 por ciento menor en los colonizados con las muestras posquirúrgicas.

¿Cómo influyen los cambios de la microbiota intestinal en sus interacciones con el eje enterocerebral y en el peso? La respuesta no está clara, pero se avistan pistas prometedoras. Ciertas poblaciones microbianas del intestino desencadenan la transmisión de señales hormonales y neuronales al encéfalo que influyen en la generación de circuitos neuronales involucrados en el control motor y en la ansiedad. Bäckhed sospecha que, tras la intervención bariátrica, la microbiota ejerce un efecto semejante en las regiones cerebrales asociadas al deseo compulsivo de comer y al apetito.

La serotonina también podría cumplir algún cometido. En torno al 90 por ciento de este neurotransmisor se fabrica en el intestino y, según publicó en 2015 un equipo del Instituto de Tecnología de California, por lo menos parte de esa síntesis corre a cargo de los microbios. Si estos varían, la producción de serotonina también lo hará. Ello comportaría un gran cambio, pues, como han confirmado numerosos estudios, la estimulación de los receptores serotoninérgicos encefálicos reduce sensiblemente el aumento de peso en roedores y humanos.

TRATAMIENTO DEL EJE ENTEROCEREBRAL

Por un feliz azar, la cirugía bariátrica está revelando nuevos caminos para tratar la obesidad, que afecta a más de 600 millones de personas en el mundo. Merced a algunas de esas innovaciones, el uso del bisturí podría quedar obsoleto o, por lo menos, reservado para los casos más graves. Así, a la vanguardia de la lucha contra el sobrepeso se situaría la actuación sobre el eje enterocerebral.

Por ejemplo, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de Estados Unidos aprobó en 2015 un dispositivo que estimula el nervio vago para aplacar el deseo compulsivo de comer. Integrado por un generador de impulsos eléctricos y electrodos, el cirujano lo implanta en el abdomen para que aplique una corriente eléctrica al nervio vago. Aunque no se conoce bien su mecanismo de acción, el estudio que logró su autorización demostró que el exceso de peso se redujo un 8,5 por ciento más en los pacientes que lo portaron durante un año, con respecto a los no tratados.

Esta estrategia ofrece una alternativa menos cruenta que la cirugía bariátrica, pero por ahora los estimuladores vagales no son tan eficaces como otros muchos tratamientos contra la obesidad. Por otra parte, algunos neurocirujanos audaces están estudiando la estimulación cerebral profunda. Aprobada para la enfermedad de Parkinson y el trastorno obsesivo-compulsivo, esta técnica consiste en estimular ciertas regiones cerebrales mediante electrodos implantados. Aunque las investigaciones se hallan en pañales, se están explorando como posibles objetivos distintas zonas del encéfalo que intervienen en el control del apetito.

En opinión del mencionado Acosta Cárdenas, de la Clínica Mayo, en el futuro la obesidad se tratará de forma muy personalizada. «La obesidad es una enfermedad del eje enterocerebral, pero creo preciso averiguar qué parte del eje se halla alterada en cada paciente para personalizar el tratamiento. Estoy intentando clasificar a los pacientes con trastornos del microbioma, hormonales o alimentarios emocionales para mejorar la respuesta al tratamiento», comenta. Su equipo examinó en 2015 múltiples factores posiblemente relacionados con la obesidad en más de 500 personas con peso normal, sobrepeso u obesidad. Entre ellos figuraban el tiempo transcurrido hasta quedar saciado, la rapidez del vaciamiento gástrico y las variaciones de los niveles hormonales en respuesta a los rasgos de la conducta alimentaria y psicológicos del sujeto en estudio. Los hallazgos de Acosta Cárdenas avalan la existencia de distintas clases de obesidad y, seguramente, que la causa y el tratamiento ideal sean propios de cada paciente. Por ejemplo, el 14 por ciento de las personas obesas de su estudio presentaba un componente conductual o emocional que desaconsejaba la cirugía o la medicación y recomendaba la terapia conductual. También vislumbra un futuro en el que se prescriban probióticos o antibióticos contra la obesidad ante anomalías de la microbiota.

Por ahora no es posible dilucidar con certeza qué trastornos del eje enterocerebral causaron el aumento de peso de Teresa. Pero está claro que la intervención fue beneficiosa, pues mantuvo su peso deseado de 72,5 kilogramos como mínimo durante los cuatro años siguientes.

No le han vuelto a doler los pies, tiene más vigor y puede seguir el ritmo de su hijo. Admite, eso sí, que con los años ha recobrado ciertas ansias por algunos alimentos, pero no tan intensas como antaño, sino mucho más manejables.

«Antes de la operación carecía de autocontrol. Era incapaz de contenerme», recuerda. «Ahora, si sirven patatas fritas en la mesa, no he de privarme en absoluto de ellas y puedo tomar unas pocas. Ya no tengo esa voracidad que me dominaba. Con toda seguridad, me llevaré a casa sobras de la comida.» IyC

PARA SABER MÁS

Conserved shifts in the gut microbiota due to gastric bypass reduce host weight and adiposity. Alice P. Liou et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 5, n.º 178, artículo n.º 178ra41, marzo de 2013.

Roux-en-Y gastric bypass and vertical banded gastroplasty induce long-term changes on the human gut microbiome contributing to fat mass regulation. Valentina Tremaroli et al. en *Cell Metabolism*, vol. 22, págs. 228-238, 4 de agosto de 2015.

Eating in mice with gastric bypass surgery causes exaggerated activation of brainstem anorexia circuit. Michael B. Mumphrey et al. en *International Journal of Obesity*, vol. 40, n.º 6, págs. 921-928, junio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El cerebro y la comida. Kristin Leutwyler Ozelli en *IyC*, noviembre de 2007.

Saciar el apetito. Ferris Jabr en *IyC*, abril de 2012.

El placer después de comer. Stephani Sutherland en *IyC*, diciembre de 2017.

La compleja fórmula de la pérdida de peso. Susan B. Roberts y Sai Krupa Das en *IyC*, enero de 2018.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Ondas cobra con palillos

Cómo construir sencillas estructuras de madera que almacenan energía elástica y que, al desestabilizarse, la liberan de forma explosiva

En una fracción de segundo la cobra se alza, atraviesa la habitación y regresa a gran velocidad. Sin embargo, no causa ningún pavor entre los asombrados espectadores. La relación entre la cobra aquí aludida y el temible reptil no pasa del nombre: se trata en realidad de lo que ha dado en llamarse «ondas cobra», o propagación de una reacción en cadena a lo largo de una estructura formada por palillos entrelazados, similar a la caída de una hilera de fichas de dominó.

Tales estructuras pueden deshacerse de manera explosiva, con proyección de los palillos en todas las direcciones, o de forma más progresiva, generando ondas que se propagan a una velocidad de varios metros por segundo. ¿Qué mecanismos se ocultan tras este fenómeno?

Estas «bombas de palillos» suelen construirse con pequeños palos de madera similares a los de los helados. Cuando estos se entrelazan de la manera adecuada, se comban dando lugar a una flecha (sagita) aproximadamente igual a su grosor. Cuando se sueltan, la energía elástica almacenada se libera y recuperan su forma inicial.

La energía elástica almacenada por los palillos se estima en varias decenas o incluso centenares de milijulios. Habida cuenta de la poca masa de un palillo (unos 2,5 gramos), se trata de una energía considerable. Para hacernos una idea, 150 milijulios corresponderían a la energía potencial gravitatoria del mismo objeto a una altura de seis metros, o a su energía cinética si avanzase a una velocidad de 11 metros por segundo. Tales cifras ya nos permiten entender mejor su potencial explosivo.

Por otro lado, la resistencia a la flexión que oponen estos palillos basta para que cada uno ejerza una presión considerable sobre aquellos con los que está en contacto. Gracias al rozamiento entre ellos, unos no resbalan sobre otros, y el conjunto, si se manipula con cuidado, se revela bastante firme. No obstante, si se deja caer al suelo, el choque puede desplazar los palillos y desestabilizar la estructura. La energía elástica almacenada se libera entonces bruscamente y los palillos saldrán proyectados con fuerza en distintas direcciones, como la metralla de una bomba.

Combinar estructuras

Uno de los atractivos lúdicos de estas estructuras entrelazadas es que pueden combinarse entre sí para formar conjuntos mayores. Consideremos el ejemplo de la «bomba cuadrada», compuesta por seis palillos y donde tres verticales se entrelazan con tres horizontales (*véase el recuadro* «Palillos entrelazados»). Cada uno de los palillos que ocupan uno de los lados del cuadrado puede usarse para añadir una bomba suplementaria. Si los disponemos de modo que, en los puntos de contacto entre dos cuadrados, los res-



BRUNO VACARO

pectivos palillos estén a uno y otro lado de un palillo común, podremos retirar este último sin que la estructura se deshaga. Este procedimiento permite construir bombas rectangulares, en ángulo recto, o cuadradas pero de mayor tamaño.

En las bombas de palillos pequeñas, la desestabilización destruye de golpe toda la estructura. En las grandes, en cambio, el fenómeno ocurre de manera progresiva, en forma de una onda que se propaga a una velocidad de varios metros por segundo. Al paso del frente de onda, la estructura se deshace y los palillos salen proyectados hasta una altura de varios centímetros. Esa distancia es mucho menor que los seis metros estimados a partir de la energía elástica y potencial, lo que significa que la conversión de energía es aquí poco eficiente: la mayor parte se disipa debido al rozamiento o en los choques entre palillos.

No obstante, en comparación con las fichas de dominó tenemos una ventaja: dado que los entrelazamientos son planos, las estructuras pueden superponerse. Y, gracias a su robustez, el paso de la onda no destruye la construcción situada debajo. Además, la energía liberada basta para que la onda no se vea perturbada por los palillos que, al azar, pudieran caer sobre la estructura.

Entrelazamientos asimétricos

La mayoría de estas bombas de palillos fueron inventadas en los años ochenta del siglo pasado por el estadounidense Timothy Fort, más conocido por su sobrenombre, Kinetic King. De todas las estructuras creadas por él, la más célebre es la conocida como «entrelazamiento cobra».

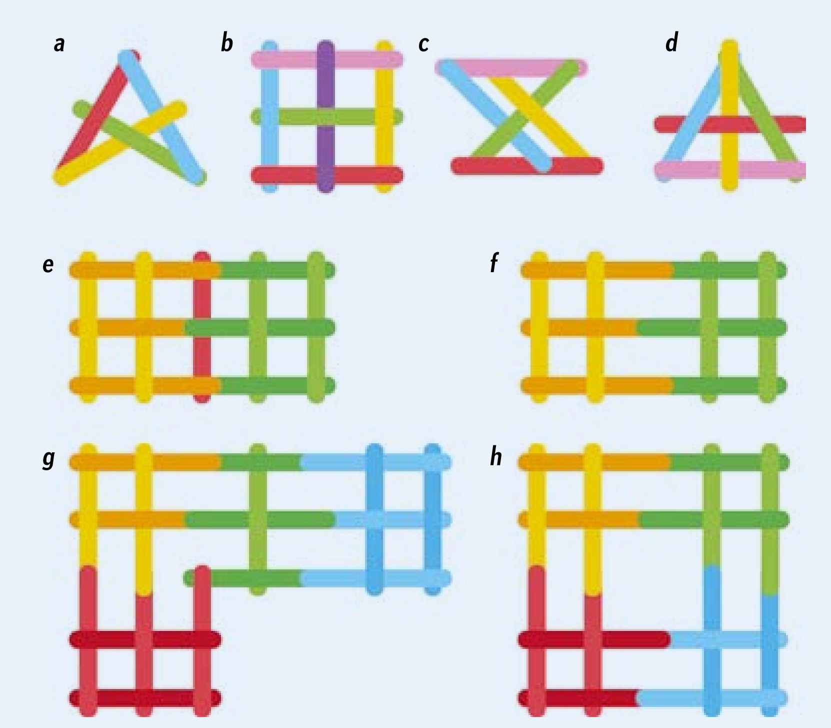
En todas las demás, la onda destructiva causa una expulsión desordenada de palillos. En la onda cobra, en cambio, la estructura se pliega, se alza y adquiere una forma característica que se propaga como una sacudida a lo largo de una cuerda, dejando tras ella caos y destrucción. Este fenómeno revela que el entrelazamiento define una dirección privilegiada a lo largo de la estructura.

Para entenderlo, consideremos primero el caso de un palillo inmovilizado por otros tres: dos en los extremos, que pasan por debajo, y uno en el centro, que pasa por encima. Cuando se retira uno de los palillos de los extremos, se produce un fuerte efecto de palanca que empuja y lanza hacia abajo el palillo considerado; es decir, en el sentido que marca palillo central. Como reacción, la estructura sufre una fuerza dirigida hacia arriba.

Si colocamos horizontalmente una estructura como la obtenida añadiendo cuadrados (*véase el recuadro* «Destrucción con y sin ondas cobra») y la desestabilizamos quitando un palillo, la alternancia de los palillos situados por encima y por debajo hará que la mitad de ellos salgan impulsados hacia arriba, y la otra mitad, hacia abajo. No hay ningún sentido privilegiado y el empuje medio que los palillos expelidos ejercen sobre la estructura será nulo.

PALILLOS ENTRELAZADOS

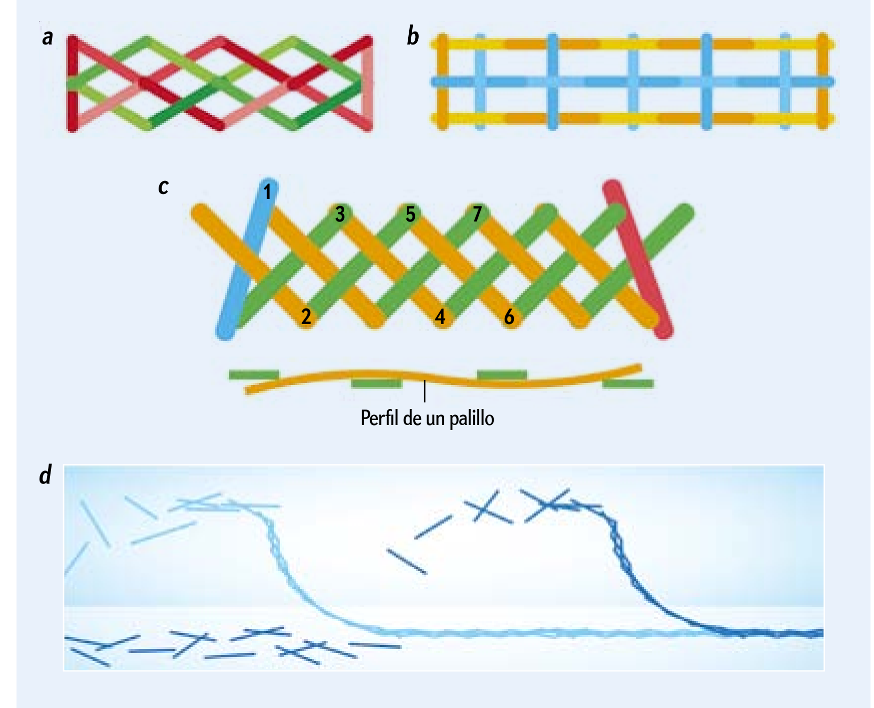
LAS BOMBAS DE PALILLOS admiten muchas posibilidades, algunas de las cuales se ilustran aquí. Los palillos se han coloreado para facilitar la visualización de la estructura. Se muestran algunas bombas básicas (*a-d*), así como otras mayores que pueden formarse combinando las primeras. Por ejemplo, es posible unir dos estructuras del tipo *d* y retirar luego el palillo común (*e*, *f*). El mismo principio permite formar un ángulo recto (*g*) o un cuadrado de mayor tamaño (*h*).



DESTRUCCIÓN CON Y SIN ONDAS COBRA

EN ESTRUCTURAS como la *a* o la *b*, el entrelazado de los palillos es simétrico con respecto al eje transversal que pasa por el centro de la trenza. En tal caso, retirar un palillo desestabiliza la construcción de tal modo que los demás salen proyectados en todas direcciones.

La situación cambia en una estructura como *c*, donde el entrelazado presenta un sentido privilegiado. Examinemos qué ocurre cuando retiramos el palillo 1 (*azul*). Al hacerlo, el 2 solo se apoya en los palillos 3 y 5, que hacen palanca. El extremo izquierdo del palillo 2 es impulsado con fuerza hacia abajo, tras lo cual sale despedido. El palillo 3 se halla entonces en la misma situación: se apoya solo en los palillos 4 y 6; recibe un impulso hacia abajo y es expulsado también. El proceso se repite una y otra vez. Cuando la estructura descansa sobre el suelo, la expulsión «se apoya» en él: los palillos rebotan y la estructura se eleva, lo que da lugar a una «onda cobra» (*d*).



Ondas ascendentes

Observemos ahora la estructura correspondiente al entrelazamiento cobra. Esta vez cada palillo está inmovilizado por otros cuatro, con apoyos opuestos en los extremos, pero de tal modo que todos los extremos izquierdos son empujados hacia abajo, y todos los derechos hacia arriba. Como consecuencia, cuando se destruye la estructura todos los palillos salen proyectados en el mismo sentido. El empuje medio sobre la estructura no es nulo: cuando la desestabilizamos por la izquierda, aparece una fuerza neta ascendente que eleva todo el conjunto.

Pero ¿qué provoca una sacudida con una forma tan característica? ¿Y cómo se relacionan las propiedades de la onda con las de los palillos y su colocación? Es esta una pregunta difícil que hace poco ha reclamado la atención de varios equipos de investigadores. Si examina la bibliografía citada aquí, el lector curioso podrá comprobar que las conclusiones de unos y otros difieren en algunos aspectos, sobre todo en lo relativo a la velocidad de la onda, las dimensiones de los palillos o la velocidad de proyección de estos. Por ahora, la onda cobra sigue ocultando algunos secretos. IyC

PARA SABER MÁS

Popsicle-stick cobra wave. Jean-Philippe Boucher et al. en *Physical Review Letters*, vol. 119, art. 084301, agosto de 2017.

The physics of a popsicle stick bomb. Jérémy Sautel et al. en *American Journal of Physics*, vol. 85, págs. 783-790, septiembre de 2017.

Espectacular vídeo del fenómeno: **www.youtube.com/watch?v=GtnZc1dujgg**

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

La ciencia de Benjamin Franklin

Polifacético, observador e imaginativo, cosechó numerosos inventos y hallazgos en campos diversos

José Manuel Sánchez Ron

En la historia de la ciencia abundan personajes singulares, pero seguramente ninguno mostró tantas habilidades en tantos ámbitos diferentes como Benjamín Franklin (1706-1790). Impresor, editor, escritor, político, diplomático, inventor y científico figuran entre las actividades por las que le recuerda la historia.

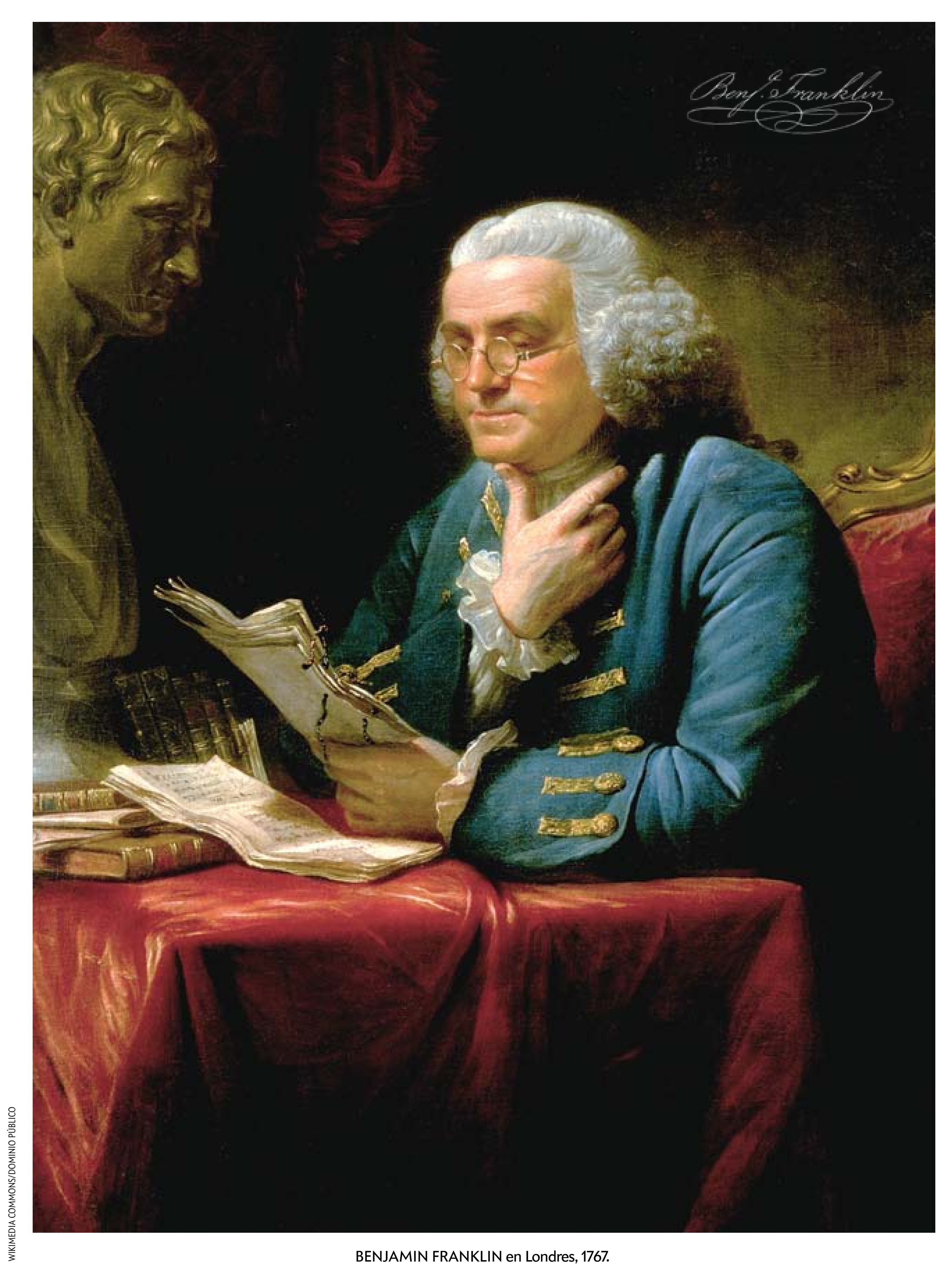
Seguramente para la mayoría su nombre está asociado a que fue uno de los cinco hombres a los que el Segundo Congreso Continental de lo que entonces eran colonias británicas encargó que redactasen la que sería la Declaración de Independencia de los Estados Unidos. El borrador inicial lo escribió Thomas Jefferson; los otros cuatro responsables (John Adams, Roger Sherman y Robert Livingston, además de Franklin) se limitaron a proponer algunas enmiendas. La más célebre provino de Franklin: el texto de Jefferson, «sostenemos que estas verdades son sagradas e innegables», Franklin lo cambió por una frase memorable, que se ha inscrito en los anales de la historia: «Sostenemos como evidentes estas verdades». Las verdades en cuestión eran «que los hombres son creados iguales; que son dotados por su Creador de ciertos derechos inalienables, y que entre estos están la vida, la libertad y la búsqueda de la felicidad».

De hecho, se ha argumentado que la idea de verdades «evidentes» se basaba menos en John Locke, uno de los filósofos favoritos de Jefferson, que en el determinismo científico de la física de Isaac Newton (también en el empirismo analítico de David Hume, amigo de Franklin). Se da la circunstancia de que Franklin estuvo a punto de conocer personalmente a Newton. En su famosa autobiografía, y refiriéndose al período que pasó en Inglaterra (fue su primer viaje a Gran Bretaña: llegó a Londres en los últimos días de 1724 y permaneció allí hasta bien entrado 1726), recordó que el doctor Henry Pemberton le «prometió hacer lo posible por presentarme a sir Isaac Newton, cosa que yo deseaba ardientemente y que por desgracia nunca ocurrió».

La recomendación era buena, puesto que Pemberton estaba preparando entonces, con la ayuda del propio Newton (que falleció en 1727), la tercera edición (1726) del gran tratado que este había publicado en 1687, *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Pemberton es recordado también por sus esfuerzos en la complicada tarea de hacer más accesible el contenido de los *Principia*, algo que consiguió con la publicación de su libro, *View of Sir Isaac Newton's philosophy* (1728), una de las tres mejores introducciones populares a la ciencia newtoniana que se publicaron en el siglo XVIII (las otras dos fueron *Account of Sir Isaac Newton's philosophical discoveries*, de Colin Maclaurin, y *Élements de la philosophie de Newton*, de Voltaire). Cuando el libro de Pemberton se publicó, Franklin ya había regresado a Norteamérica, pero en 1732 su amigo Peter Collinson, que era miembro (*fellow*) de la Real Sociedad londinense, se lo envió como regalo. Contribuyó así a la formación científica de Franklin, cuya escasa educación matemática le imposibilitaba estudiar el libro de Newton. Las aportaciones de Franklin a la ciencia se basaron siempre en la observación, experimentación y su muy poderosa imaginación.

El viaje de Franklin a Inglaterra no tuvo, en principio, nada que ver con la ciencia. Lo realizó con la ayuda del gobernador de Pensilvania, sir William Keith, que deseaba contar con una buena imprenta en Filadelfia, por lo que sugirió al joven Franklin —que había aprendido las técnicas impresoras con uno de sus hermanos en Boston, pero que buscó emanciparse de la rígida tutela de este trasladándose a Filadelfia— que viajara a Londres para que comprase allí la maquinaria necesaria y aprendiera de otros impresores.

Fue a partir de 1743 cuando Franklin —por entonces ya con los suficientes recursos económicos para dedicarse a lo que le gustaba— comenzó a producir resultados científicos que atrajeron la atención de los estudiosos europeos. Y lo hizo primero en el campo de la electricidad, por el que comenzó a interesarse durante una visita que realizó a Boston en el verano de aquel año. Asistió entonces a unas charlas de un científico escocés, Archibald Spencer, que se ganaba la vida dando conferencias,



WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

BENJAMIN FRANKLIN en Londres, 1767.

y que mostró algunas curiosidades —de las que tanto atraían en los salones ilustrados franceses e ingleses— protagonizadas por fenómenos eléctricos. Ayudándose de botellas de Leiden (botellas recubiertas de metal tanto por el interior como por el exterior, que almacenaban electricidad; un modelo primitivo del condensador), Franklin llegó a la conclusión de que la electricidad era un fluido, que podía pasar de un cuerpo a otro mediante la transferencia de lo que suponía «cargas eléctricas» (la unidad de electricidad, el electrón, fue identificada por Joseph J. Thomson en 1897). El cuerpo que recibía esa carga quedaba cargado positivamente, mientras que el que la perdía se cargaba negativamente. Fue, pues, el primero en introducir los conceptos de «carga eléctrica positiva» y «carga eléctrica negativa». En una carta que envió el 11 de julio de 1747 a Peter Collinson, Franklin le explicaba un experimento que había llevado a cabo:

1. Una persona de pie sobre cera, que se frote con un tubo [una forma de, en principio, electrizarse], y otra que también esté sobre cera y atraiga la chispa (siempre que no se toquen una a otra), parecen estar electrizadas para quien las observa desde el suelo. Recibirá esta persona una chispa cuando se aproxime a cualquiera de esas personas con los nudillos por delante.

2. Pero si las personas que están sobre la cera se tocan mientras se excita el tubo, ninguna parecerá electrizarse.

3. Si se tocan una a otra tras excitar el tubo y hacer saltar la chispa, tal como se ha dicho, se producirá una descarga entre ellas mayor que la que se produciría entre cualquiera de ellas y la tercera persona que esté en el suelo.

4. Después de la descarga, ninguna de ellas notará que está electrizada.

Para nosotros, todo este experimento significa lo siguiente. Como se ha explicado, la corriente eléctrica es un elemento común que las personas descritas tienen en igual proporción antes de que se haga ninguna operación con el tubo. La persona A que está de pie sobre la cera y frota el tubo eléctrico recoge corriente eléctrica de ella misma y la lleva al tubo. Como su comunicación con la masa se interrumpe a causa de la cera, su cuerpo no vuelve a cargarse. B (que también está sobre la cera), al pasar los nudillos cerca y a lo largo del tubo, recibe la corriente recogida allí de A; y como su comunicación con tierra está también cortada por la cera, retiene la mayor cantidad que ha recibido. A la persona C, que está sobre el suelo, le parece que las dos anteriores están electrizadas, pues por tener solamente ella la cantidad media de corriente eléctrica, recibe una descarga al aproximarse a la persona B, que está sobrecargada, pero da otra cantidad a A, que tiene menos carga. Si A y B se aproximan y entran en contacto, la descarga es aún mayor porque la diferencia de carga eléctrica entre ellos es más grande. Después de ese contacto ya no salta más descarga entre ninguno de ellos y C porque se ha igualado la carga eléctrica en todos. Y si se tocan mientras se están cargando, la igualdad nunca se interrumpe y el fluido eléctrico se limita a circular. De esto hemos deducido algunas proposiciones. Decimos que B (y cualquier cuerpo en sus mismas condiciones) se electriza positivamente y A negativamente, o, más bien, que B se electriza más y B menos.

No se limitó Franklin a esta contribución —teórica, pero carente de aparato matemático— en el dominio de la electricidad. Es bien conocido que fue el inventor del pararrayos, al que aludía al comienzo de la anterior carta a Collinson:

Muy señor mío:

Tal como le informaba en mi anterior carta, durante el transcurso de nuestras experiencias en materia eléctrica hemos observado algunos fenómenos especiales que para nosotros resultaban inéditos y de los que prometí darle noticia, aun a sabiendas de que quizá le resultarían familiares en atención a lo abundante de sus propias experiencias con agua.

El primer efecto maravilloso que he observado es que los cuerpos afilados son especialmente idóneos para atraer y repeler electricidad.

Y a continuación le explicaba el experimento que había realizado.

Uno de sus escritos (no una carta) de 1753 contiene unas «instrucciones para la construcción de pararrayos». Merece la pena citarlo:

Dios ha permitido en su magnanimidad para con la humanidad que por fin se descubriese el sistema de defender las viviendas contra las calamidades de los rayos. El método para lograrlo consiste en lo siguiente: se coloca una pequeña varilla de hierro (puede valer la que se utiliza para la fabricación de clavos), de tal largo que un extremo se clave en la tierra húmeda unos tres o cuatro pies, y el otro sobresalga de seis a ocho pies sobre la parte más alta del edificio. En la parte alta de la varilla se conecta un pie de alambre de latón del calibre de las agujas corrientes de calceta, y se afila su parte superior. La varilla se fija al edificio con unas cuantas grapas [...] El edificio dotado con tal artilugio no será dañado por el rayo, que será atraído por las varillas puntiagudas y llegará a tierra a través de los cables, sin causar perjuicio alguno.

En otra de sus cartas a Collinson, esta del 19 de octubre de 1752, le explicaba que «la atracción del fuego eléctrico de las nubes por medio de varillas de hierro puntiagudas instaladas en edificios altos» podía lograrse de una manera diferente. Y pasaba a explicar su célebre experimento con una cometa.

Un científico polivalente

Cuando se repasa la correspondencia de Franklin, las cartas que envió y las que recibió, se constatan los diversos campos en los que dejó huella. Entre estos mencionaré, por ejemplo, que en sus viajes transatlánticos identificó la corriente del Golfo: el 29 de octubre de 1769 informaba a Anthony Todd en este sentido, y años más tarde, cuando regresaba de Francia a Norteamérica (fue su viaje final), realizó medidas que mostraban que la temperatura de la corriente disminuía con la profundidad, lo que venía a decir que se trataba de una especie de río que circulaba por el océano. Desde el barco en que viajaba, escribía en agosto de 1875 a David Le Roy que «esta corriente se genera probablemente por

la gran acumulación de agua en la costa del este de América entre los trópicos, por los vientos alisios que circulan constantemente por allí». Otro invento suyo especialmente celebrado fue el de las lentes bifocales.

Mantuvo contacto con algunos de los científicos más destacados de su tiempo. Joseph Priestley, el teólogo y activista social que se convirtió en científico y se instaló en Norteamérica, recordado especialmente por sus aportaciones al estudio de «los aires» presentes en la atmósfera (identificó el oxígeno, para él «aire desflogisticado»), conoció a Franklin en 1765, al comienzo de la segunda estancia de este en Inglaterra (que se prolongó hasta 1770). En una carta que Priestley envió a Franklin el 1 de julio de 1772, le explicaba el famoso experimento que hizo con ratones y que difundió más tarde en su libro *Experiments and observations on different kinds of air* (1774):

Querido señor:

Imagino que ya habrá llegado a Londres y me gustaría aprovechar esta oportunidad para informarle de que nunca he estado más ocupado ni he tenido tanto éxito realizando experimentos como después de haber tenido el placer de verle en Leeds.

Estoy completamente seguro de que el aire que se ha convertido en altamente nocivo debido a la respiración [al emitir dióxido de carbono], recupera [sus propiedades] si se hace crecer en él ramitas de menta [que emiten oxígeno]. Probablemente recordará el floreciente estado en que vio una de mis plantas. El sábado después de que usted se fuese, puse un ratón en el aire en el que estaba creciendo [la planta] desde hacía siete días, y continuó allí durante cinco minutos sin mostrar ningún signo de molestia, tras lo cual lo saqué [del receptáculo cerrado en el que ratón y planta se encontraban] mostrándose bastante fuerte y vigoroso, mientras que un ratón murió después de apenas dos segundos cuando estaba en la misma cantidad de aire que se había mantenido en las mismas condiciones pero sin ninguna planta dentro. El mismo ratón que vivió bien en el aire restaurado, apenas se pudo recuperar tras permanecer no más de un segundo en el otro aire.

También conoció a Lavoisier. Fue durante los años que vivió en París (1776-1785) defendiendo como embajador los intereses de Estados Unidos, que pugnaban por afirmar su recientemente declarada independencia de Gran Bretaña. El 8 de junio de 1777, Lavoisier escribía a Franklin:

Sir:

Hemos reservado el próximo jueves, 12 de este mes, para repetir algunos de los principales experimentos del señor Priestley sobre los diferentes tipos de aire. Si usted está interesado en estos experimentos, nos sentiríamos muy honrados contando con su presencia. Proponemos comenzar a la una en punto y reanudarlos inmediatamente después de comer. Deseo sinceramente que pueda aceptar esta invitación; solamente estarán los señores Le Veillard, Brisson y Beront —demasiadas personas no son, en general, convenientes para el éxito del experimento.

Lo que decía en esta carta Lavoisier no carece de interés histórico, pues el tipo de «aire» que había identificado Priestley desempeñó un papel muy importante en la nueva química que creó Lavoisier, quien bautizó al «aire desflogisticado» de aquel como «oxígeno».

Globomanía

Los años que Franklin permaneció en París le permitieron asistir al nacimiento de un nuevo fenómeno: la «aerostación», o navegación aérea por medio de globos (aerostatos). La era de la navegación aérea comenzó en junio de 1783, cuando los hermanos Joseph-Michel y Jacques-Étienne Montgolfier lanzaron cerca de Lyon un globo no tripulado relleno de aire caliente, que se elevó a algo menos de dos kilómetros de altura. Franklin no asistió a aquella demostración, pero sí a la que se llevó a cabo a finales de agosto con un globo, también no tripulado, que utilizaba hidrógeno. El 30 de agosto, informaba de lo que había visto al botánico y viejo conocido suyo, Joseph Banks, presidente de la Real Sociedad inglesa:

Sir:

El miércoles 27, el Sr. Charles, profesor de filosofía experimental en París, repitió el nuevo experimento aerostático, inventado por los Sres. Montgolfier de Annonay.

Con lo que en Inglaterra se llama seda aceitosa, y aquí tafetán gommée, se formó un globo hueco de 12 pies de diámetro, habiendo sido impregnada la seda con una solución de goma elástica en, como se dice, aceite de linaza. Las partes se pegaron con la goma mientras estaban húmedas, y parte de esta se pasó después por las junturas, para hacer que fuese lo más hermético posible.

Después se lo rellenó con gas inflamable [era hidrógeno] que se produjo echando aceite de vitriolo sobre limaduras de hierro, hasta que se vio que tenía una tendencia a ascender tan fuerte como para poder levantar un peso de 39 libras, además de su propio peso, que era de 25 libras, y del peso del aire que contenía.

Se lo llevó temprano por la mañana al Campo de Marte, un lugar en el que a veces se realizan revistas militares, en la parte que se halla entre la Escuela Militar y el río. Allí se lo mantuvo abajo sujetándolo con una cuerda, hasta las 4 de la tarde, cuando se dejó que se elevase, pero manteniéndolo aún atado a tierra. Antes de esa hora, se tuvo cuidado de reemplazar la parte de gas inflamable, o de su fuerza, que se había perdido, inyectando más.

Se supone que se reunieron no menos de 50.000 personas para ver el experimento. El Campo de Marte estaba rodeado de multitudes y había un gran número de personas en el lado opuesto del río.

A las 5 en punto se avisó a los espectadores disparando dos cañones, y se cortó la cuerda. Y se vio al globo elevarse [...] Hacía un poco de viento, pero no era muy fuerte. Lo había mojado algo de lluvia, de manera que relucía, dándole una apariencia agradable. Disminuyó en su tamaño aparente según iba elevándose, hasta que penetró en las nubes, cuando me pareció apenas mayor que una naranja, y pronto se hizo invisible, al ocultarlo las nubes.

La multitud se disgregó, todos muy satisfechos y muy felices con el éxito del experimento, y entreteniéndose con conversaciones sobre las posibles aplicaciones que se le podía dar, algunas muy extravagantes. Posiblemente abra el camino a descubrimientos en filosofía natural que ahora no imaginamos.

Se puso una nota, asegurándose de que no la pudiese deteriorar el tiempo, detallando la hora y el lugar de la partida, y rogando a quienes lo pudiesen encontrar que enviasen un informe de su estado a ciertas personas de París. No se supo nada hasta el día siguiente, cuando se recibió información de que había caído un poco después de las 6 en Gonesse, a unas 4 leguas de distancia; se hallaba rasgado, y algunos dicen que tenía hielo. Se supone que había explotado debido a la elasticidad del aire que contenía cuando este ya no pudo comprimirse más en una atmósfera tan pesada.

El propio Sr. Montgolfier está preparando uno de 38 pies de diámetro, a cuenta de la Academia, que se elevará dentro de unos pocos días. Se dice que se construirá con lino y papel, y que se rellenará con un aire diferente, aún no hecho público, pero más barato que el producido por el aceite de vitriolo, del cual se necesitaron 200 pintas parisinas para rellenar el primero.

Se dice que durante algunos días después de haberlo rellenado, se comprobó que el globo perdía una octava parte de su poder de ligereza en 24 horas. Si ello se debe a imperfecciones en la impermeabilidad del globo o a un cambio en la naturaleza del aire, es algo que se podrá descubrir fácilmente mediante experimentos.

Pensé que era mi deber, sir, enviar pronto un informe de este extraordinario hecho a la Sociedad [la Real Sociedad de Londres] que me hace el honor de contarme entre sus miembros; y me esforzaré por hacerlo más perfecto según reciba más información.

Y añadía en una posdata:

Acabo de saber que algunos observadores dicen que el globo tardó 150 segundos en elevarse, desde que se cortó la cuerda hasta que se ocultó en las nubes; que su altura era entonces de 500 toesas [medida francesa equivalente a 1,946 metros], pero que al salirse de la perpendicular debido al viento, tuvo que inclinarse formando un triángulo, cuya base en la tierra era de unas 200 toesas. Se dice que los campesinos que lo vieron caer se asustaron mucho, pensando al verlo botar un poco cuando tocó tierra que había algún animal vivo dentro; lo atacaron con piedras y cuchillos, de manera que quedó bastante destrozado; pero ahora ha sido traído a la ciudad y será reparado.

Se dice que el grande del Sr. Montgolfier será lanzado, desde Versalles, en unos 8 o 10 días. No es un globo, ya que tiene una forma diferente, más adecuada para penetrar el aire. Tiene una capacidad de 50.000 pies cúbicos y se le supone una fuerza de elevación igual a un peso de 1500 libras. Un filósofo de aquí, M. Pilatre de Rozier, ha solicitado formalmente a la Academia ir en él, para realizar algunos experimentos. Se le alabó por su celo y coraje a favor de la promoción de la ciencia, pero se le advirtió que esperase hasta que la experiencia hiciese más conocidos y seguros estos globos. Dicen que rellenarlo a la manera del Sr. Montgolfier no costará más de media corona. Alguien ha dicho que tendrá 110 pies de diámetro. Varios señores han encargado globos pequeños para su entretenimiento; uno ha encargado cuatro, cada uno de 15 pies de diámetro; no sé con qué propósito; pero tal es el entusiasmo por promover y mejorar este descubrimiento que probablemente pronto se realizará un progreso considerable en el arte de construir y utilizar estas máquinas.

Entre las conversaciones para entretenerse a que ha dado origen este tema, algunas suponen que con esto se ha inventado el vuelo, y que como las personas pueden ser mantenidas en el aire, lo único que falta son algunos instrumentos fácilmente disponibles para darles movimiento y para dirigirlos. Algunos piensan que con ellos se avanzará en los movimientos sobre la tierra, y que una persona o un caballo colgado o suspendido de uno de estos globos, de manera que no ejerza con sus pies más peso sobre el suelo que tal vez 8 o 10 libras, podrá, con un viento razonable, atravesar en línea recta países con la misma rapidez que el viento, y pasar sobre setos, zanjas y hasta sobre aguas. Incluso se ha imaginado que con el tiempo la gente tendrá estos globos anclados en el aire, y mediante poleas podrán subir carne de caza para conservarla en frío, y agua para que se congele cuando se desea hielo. Y para ganar dinero, se ofrecerá a la gente una amplia vista del país, subiéndolos en un sillón a una altura de una milla por una guinea, etcétera, etcétera.

No parece, sin embargo, que Banks quedase muy impresionado por las noticias que recibió de Franklin (y de otros). Al menos esto es lo que se deduce de lo que escribió en su contestación a Franklin (en la que acuñó el término *ballonmania*, esto es, «globomanía»):

Creo que observo entre las partes más respetables de la Real Sociedad una inclinación, que ha prevalecido, a protegerse de la globomanía y a no apoyar los globos por el mero hecho de que son capaces de elevarse en la atmósfera, hasta que se proponga que se realice con ellos algún experimento que pueda probablemente resultar beneficioso para la Sociedad o para la ciencia.

Como vemos por estos meros apuntes, la biografía de Benjamín Franklin solo se puede calificar de extraordinaria.

PARA SABER MÁS

The ingenious Dr. Franklin. Selected scientific letters of Benjamin Franklin. Edición de Nathan G. Goodman. University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1956.
A scientific autobiography of Joseph Priestley (1773-1804). Selected scientific correspondence. Edición de Robert E. Schofied. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1966.
Autobiografía y otros escritos. Benjamin Franklin. Edición de Luis López Guerra. Editora Nacional, Madrid, 1982.
Experimentos y observaciones sobre electricidad. Benjamin Franklin. Edición de Joaquín Summers Gámez. Alianza Editorial, Madrid, 1988.
Benjamin Franklin: An American life. Walter Isaacson. Simon & Schuster, Nueva York, 2003.

EN NUESTRO ARCHIVO

Electrificación en las tormentas. Earle R. Williams en *IyC*, enero de 1989.
El papel del oxígeno: 1777-1782. Marco Beretta en «Lavoisier», Colección *Temas* de *IyC* n.º 64, 2011.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.



El conjunto de Cantor

Las sorprendentes propiedades del primer fractal de la historia

Uno de los conjuntos más extraños y al mismo tiempo fáciles de analizar y construir es el conjunto de Cantor. Conocido desde hace casi un siglo y medio, sus propiedades guardan relación con la topología, el infinito y los fractales. ¿En qué consiste?

El conjunto de Cantor puede construirse como el límite de un proceso geométrico de infinitos pasos. Dividamos el segmento unidad $[0,1]$ en tres intervalos idénticos, de longitud 1/3, y borremos el intervalo abierto central; es decir, el intervalo $(1/3,2/3)$ (*véase la figura 1*). Después repitamos la operación para cada uno de los intervalos cerrados resultantes. Al hacerlo, obtendremos cuatro segmentos de longitud 1/9. Tras iterar el proceso n veces, acabaremos con 2^n intervalos cerrados idénticos y de longitud $1/3^n$. En cada paso n, llamaremos I_n a la unión de todos los intervalos de los que disponemos.

El conjunto de Cantor se define, en el límite en el que n tiende a infinito, como la intersección de todos los conjuntos I_n definidos antes:

$$C = \cap_{n=1}^{\infty} I_n .$$

Es decir, como el conjunto de puntos supervivientes.

C toma su nombre del famoso matemático alemán Georg F. L. P. Cantor, quien en 1883 caracterizó sus extraordinarias propiedades. Con todo, su verdadero descubridor fue Henry John Stephen Smith, un profesor de geometría de Oxford que le dio vida en 1874 mediante una variante generalizada del procedimiento geométrico que acabamos de describir.

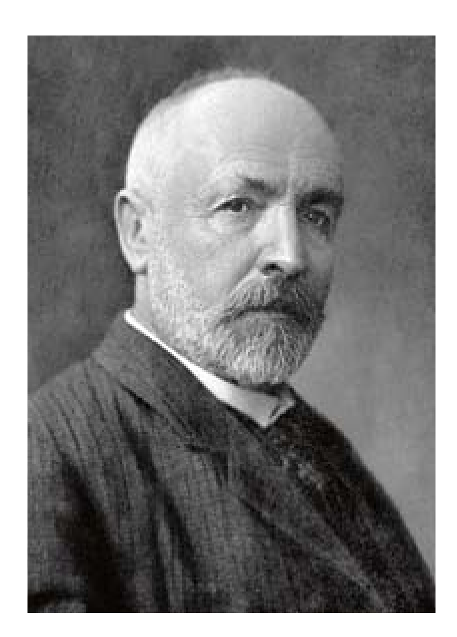
¿Por qué es C excepcional? Si consideramos el número de segmentos que hemos eliminado en cada iteración y sus respectivas longitudes (*véase la tabla 2*), podremos ver con facilidad que la longitud total suprimida cuando n tiende a infinito viene dada por

$$\frac{1}{3}+\frac{2}{9}+\frac{4}{27}+\frac{8}{81}+\cdots =$$

$$\frac{1}{3}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{2}{3}\right)^n=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{1-\frac{2}{3}}\right)=\frac{1}{3}\cdot 3=1 .$$

¡Pero eso significa que la longitud de C es cero! Los matemáticos dicen que C es un conjunto «de medida nula». Pero entonces, después de borrar tanto intervalo, ¿nos queda algo o no?

Observemos que los intervalos suprimidos son abiertos; es decir, nunca eliminamos los puntos de los extremos. Cuando borramos el intervalo $(1/3,2/3)$ en el paso $n = 1$, por ejemplo, se salvan de la quema los puntos 1/3 y 2/3. Los extremos del intervalo borrado seguirán presentes en todos los I_n. Esto nos permite concluir que C no está vacío, ya que puntos como 0, 1, 1/3, 2/3, 1/9, 2/9... pertenecen sin duda a C.



El matemático alemán Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor (1845-1918).

C en base 3

¿Contiene C más puntos, además de los extremos de los segmentos eliminados? Pues, contrariamente a toda nuestra intuición, la respuesta es afirmativa. Para demostrarlo, empleemos la representación de los números reales en base 3, la notación ternaria, en vez de la decimal.

En el sistema decimal, cuando escribimos 0,238, queremos decir

$$2\cdot 10^{-1} + 3\cdot 10^{-2} + 8\cdot 10^{-3} .$$

En general, la expansión decimal de cualquier número x del intervalo $[0,1]$ puede expresarse como

$$x=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{a_n}{10^n} ,$$

donde los dígitos a_n pueden ser aquellos comprendidos entre el 0 y el 9. En base 3 solo usaremos los dígitos $a_n = 0, 1, 2$, y representaremos un número x del intervalo $[0,1]$ de la forma

$$x=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{a_n}{3^n} .$$

Así que el número decimal 1/3 = 0,333... se escribe en notación ternaria como 0,1; mientras que 2/3 = 0,666... se representa como 0,2.

Observemos que la notación decimal es ambigua para ciertos valores. Así ocurre en el caso de 1/10, que puede expresarse como 0,1 pero también como 0,0999... En notación ternaria ocurre lo mismo: por ejemplo, 0,1 = 0,0222...

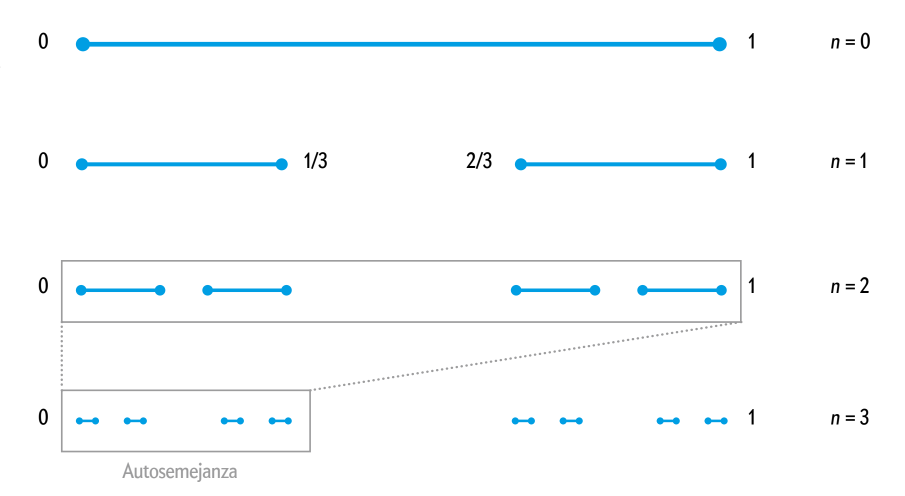
La notación ternaria es útil en nuestro contexto porque nos permite determinar muy fácilmente la pertenencia o no de un número a los intervalos que vamos eliminando. Por ejemplo, en el paso $n = 1$, en el que creamos tres subintervalos, todos los números del subintervalo $[0,1/3]$ tienen como primer decimal un 0 en notación ternaria (incluido el extremo 1/3, que en ternario podemos representar por 0,0222..., como hemos comentado).

Por su parte, todos los números en el intervalo (1/3,2/3) tienen como primer decimal un 1 en notación ternaria, y todos los pertenecientes al intervalo [2/3,1] tienen como primer decimal un 2 (incluido el extremo 1, cuya representación ternaria puede escribirse como 0,222...).

Así pues, cuando borramos el subintervalo central (1/3,2/3), estamos eliminando todos aquellos puntos de [0,1] que tienen el dígito 1 como primer decimal en su representación ternaria. En la segunda iteración suprimimos todos los puntos que tienen el dígito 1 en su segundo decimal, y así sucesivamente.

Tras iterar el proceso infinitas veces, solo habrán sobrevivido aquellos puntos que no presenten el dígito 1 en ninguna posición de su representación ternaria. Es decir, *C* está formado por todas las posibles expresiones ternarias en el segmento unidad constituidas por combinaciones de los dígitos 0 y 2. De hecho, esta fue la definición que dio el propio Cantor. Y que, dicho sea dicho de paso, elimina cualquier duda sobre la existencia misma del conjunto *C*, el cual hasta ahora solo habíamos definido por medio de un procedimiento gráfico de infinitos pasos.

Con esta caracterización de *C* en base 3 podemos retomar la pregunta: ¿tenemos más o menos puntos que aquellos correspondientes a los extremos de los que hablábamos antes? Los puntos extremos de los intervalos poseen infinitos dígitos 0 o 2 consecutivos a partir de una determinada posición. Pero existen otras posibilidades, como por ejemplo 0,0200220002220000 2222... Consideremos el número 1/4. Este no corresponde al extremo de ninguno de los intervalos eliminados. Sin embargo, su expansión ternaria puede escribirse exclusivamente



1. Primeras tres iteraciones de la construcción geométrica del conjunto de Cantor y un apunte visual de su autosemejanza: si multiplicamos por 3 los cuatro segmentos de la izquierda en la iteración *n* = 3, recuperamos la construcción completa del paso anterior.

Iteración	Número de segmentos eliminados	Longitud de cada segmento eliminado
0	0	0
1	1	1/3
2	2	1/9
3	4	1/27
...	...	...

2. Número y longitud de los segmentos eliminados en cada paso de la construcción del conjunto de Cantor.

con los dígitos 0 y 2, como puede computar el lector. Así pues, y aunque no es el extremo de ninguno de los intervalos eliminados, pertenecerá a *C*.

El tamaño de *C*

Si el conjunto de Cantor solo estuviera formado por los valores extremos de los que hablábamos, entonces podríamos enumerarlos, ya que podemos enumerar las iteraciones y cada una de ellas salva un número finito de extremos. ¿Podemos enumerar entonces todos los puntos del conjunto de Cantor? En definitiva, ¿cuántos puntos hay en *C*?

Responder a esta pregunta equivale a determinar cuántos números del intervalo [0,1] carecen en su representación ternaria del dígito 1. Para verlo, recurramos a la notación binaria.

Supongamos que representamos todos los números reales del intervalo [0,1] en base 2. En este caso, los dígitos solo pueden ser 0 o 1. Podemos construir entonces una biyección entre este conjunto (los puntos del intervalo [0,1] en notación binaria) y el de todos los números en notación ternaria que carecen del dígito 1. Para ello, basta con asignar a cada decimal binario uno ternario siguiendo el método de sustituir cada dígito 1 por el dígito 2 (*véase la figura 3*).

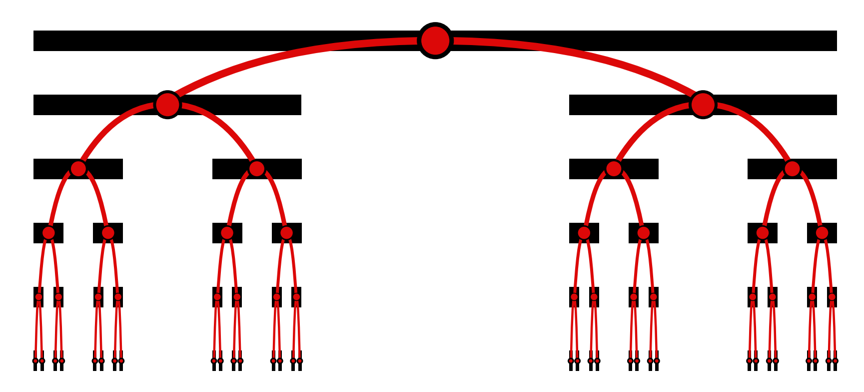
Así pues, dado que el número de elementos en el intervalo [0,1] es no numerable, tampoco lo es la cantidad de puntos en *C*. Observemos entonces que la probabilidad de escoger al azar un número x de *C* y que sea el extremo de uno de los intervalos eliminados es nula. Pero lo más sorprendente es que la probabilidad de escoger al azar un número x del intervalo [0,1] y que pertenezca a *C* es también nula, ¡a pesar de que *C* tiene tantos puntos como la recta real!

C no contiene ningún intervalo, es un «polvo» de puntos. Sin embargo, ninguno de ellos está aislado. Es decir, cualquier entorno, por pequeño que sea, alrededor de un punto de *C* contiene una infinidad de puntos de *C*. Y ya que estamos, ahí va un problema relacionado: decimos que la expansión de un número es finita si a partir de cierto dígito n todos los demás son 0. Claramente, la cantidad de números de *C* con expansión finita en base 3 es infinita. Sin embargo, y sorprendentemente, la cantidad de números con expansión finita en base decimal es 14. ¿Podría determinar estos números?

Topología de *C*

No cabe duda de que *C* es singular. Dado que además de carecer de puntos aislados es un conjunto cerrado (recordemos que lo creamos como intersección de conjuntos cerrados), se trata de un conjunto que los topólogos llaman «perfecto». Así que Cantor creó un subconjunto de números del intervalo [0,1] de medida cero y que al mismo tiempo era no numerable, totalmente disconexo y perfecto. Si todo esto que hemos visto le parece extraño, le sorprenderá todavía más lo que se obtiene al sumar todos los posibles pares de números pertenecientes a *C*.

Es fácil ver que, si sumamos todos los posibles pares de números del intervalo [0,1], obtenemos el intervalo [0,2]. ¿Qué ocurre si hacemos lo propio con *C*? En otras palabras, ¿qué nos dará *C* + *C*?



3. Cada punto x del conjunto de Cantor queda determinado por un camino infinito en un árbol binario (*rojo*), donde en cada ramificación se toma el camino a derecha o izquierda de acuerdo con el intervalo (*negro*) al que pertenece x. Si representamos el camino como una tira de dígitos, donde 0 significa «izquierda» y 2 «derecha», obtenemos la representación de x en base 3. Si para cada punto x en notación ternaria cambiamos el dígito 2 por 1 e interpretamos el resultado en notación binaria, habremos creado una biyección entre los puntos de C y todos y cada uno de los puntos del intervalo [0, 1].

Si tomamos un punto x de C y le sumamos otro punto y del conjunto, el resultado en notación ternaria puede escribirse como

$$z = x + y = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{3^n} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{3^n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{3^n}\,.$$

Recordemos que tanto x como y solo poseen dígitos 0 o 2 en sus expansiones ternarias. Sin embargo, como $c_n = a_n + b_n$, el número z puede tener también dígitos 1 en su expansión, ya que las sumas 2+2 producen unos. Pero eso significa que z puede ser cualquier número del intervalo [0,2]. De modo que, al igual que

$$[0,1] + [0,1] = [0,2]\,,$$

sorprendentemente,

$$C + C = [0,2]\,.$$

Podemos llegar al mismo resultado observando que $C/2$ está constituido por valores cuyas expansiones ternarias solo contienen 0 y 1. De modo que

$$C/2 + C/2 = [0,1]\,,$$

y multiplicando por 2 la igualdad obtenemos el mismo resultado.

C de caos

Además de todo lo anterior, el conjunto de Cantor ostenta el título de primer fractal de la historia. En la figura 1 podemos apreciar la propiedad más característica de los fractales: la autosemejanza. Pero gracias a la representación ternaria podemos deducirla de otra manera.

Observemos que todos los puntos x de C pertenecientes al intervalo [0,1/3] son de la forma

$$x = 0{\cdot}3^{-1} + a_1{\cdot}3^{-2} + a_2{\cdot}3^{-3} + \cdots$$

Es decir, números en notación ternaria con su primer dígito igual a 0 y el resto 0 o 2. Si multiplicamos todos ellos por 3, que es equivalente a eliminar el 0 y desplazar a la izquierda el resto de los dígitos, obtendremos C. Esto es, si escalamos C por un factor 1/3, obtenemos la parte de C presente en el intervalo [0,1/3].

Para los puntos pertenecientes al intervalo [2/3,1], con su primer dígito ternario igual a 2, el razonamiento es semejante, con la salvedad de que debemos añadir un desplazamiento de 2/3. Y desde cualquiera de los demás subintervalos podemos recuperar C multiplicando y desplazando adecuadamente los puntos que incluye. En cada parte de C está contenida la información del todo.

Podemos concretar estas transformaciones afines. Recordemos que en la expansión ternaria de un punto x perteneciente a C, $x = 0{,}a_1a_2a_3a_4\ldots$, no hay dígitos de valor 1. El operador w_1, que se aplica a puntos con $a_1 = 0$ eliminando ese dígito y desplazando a la izquierda el resto,

$$w_1(0{,}0a_2a_3a_4\ldots) = 0{,}a_2a_3a_4\ldots\,,$$

actúa como nuestra primera transformación, y es equivalente en notación decimal a multiplicar por 1/3. Algebraicamente podemos escribirlo como $T_1(x) = x/3$.

El operador w_2, que se aplica a puntos con $a_1 = 2$ de manera semejante,

$$w_2(0{,}2a_2a_3a_4\ldots) = 0{,}a_2a_3a_4\ldots\,,$$

actúa como nuestra segunda transformación y es equivalente en notación decimal a $T_2(x) = x/3 + 2/3$.

Las dos transformaciones afines T_1 y T_2 forman un sistema de ecuaciones iteradas [*véase* «El juego del caos», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, mayo de 2019] y su operador de Hutchinson se define sobre un conjunto de puntos A como $H(A) = T_1(A) + T_2(A)$. Y efectivamente, resulta que C es el único conjunto invariante bajo H. Es decir, que $H(C) = C$, como puede ver fácilmente el lector si usa los operadores w_1 y w_2. Observemos que al principio vimos que C podía obtenerse como el límite de un proceso, y que ahora lo hemos obtenido como el punto fijo de un operador.

Déjenme acabar con una última sorpresa. Para cualquier valor x_0 negativo o positivo mayor que uno, el sistema dinámico discreto

$$x_{n+1} = \begin{cases} 3x_n, & x \leq 0{,}5 \\ -3x_n + 3, & x > 0{,}5 \end{cases}$$

genera trayectorias que escapan hacia menos infinito y más infinito, respectivamente. Sin embargo, $x_0 = 0$ es un punto fijo. ¿Hay más?

La respuesta es afirmativa y forman lo que se conoce como atractor. Si el atractor resulta ser fractal, se denomina atractor extraño. Las dinámicas caóticas, que generan órbitas aperiódicas con sensibilidad extrema a las condiciones iniciales, convergen a atractores extraños. Así que, en cierto modo, los atractores extraños revelan en forma de fractal el orden oculto en el caos. El lector puede demostrar que el atractor de este sistema dinámico es un atractor extraño: precisamente, el conjunto de Cantor. IyC

PARA SABER MÁS

On the Integration of Discontinuous Functions. Henry J. Stephen Smith en *Proceedings of the London Mathematical Society*, vols. 1-6, págs. 140-153, noviembre de 1874.

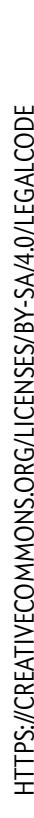
Terminating decimals in the Cantor ternary set. Charles R. Wall en *The Fibonacci Quarterly*, vol. 28, págs. 98-101, enero de 1990.

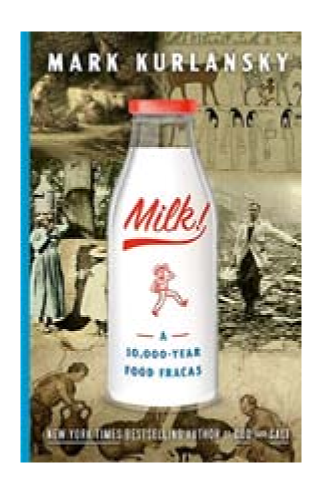
Curiosidades sobre el conjunto de Cantor. Marta Macho en *Un paseo por la geometría 1999-2000*. Real Sociedad Española de Matemáticas, 2000. Disponible en **www.divulgamat.net**

Chaos and fractals: New frontiers of science. Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens y Dietmar Saupe. Springer Verlag, 2004.

EN NUESTRO ARCHIVO

Georg Cantor y la teoría de conjuntos transfinitos. Joseph W. Dauben en *IyC*, agosto de 1983.





MILK!
A 10,000-YEAR FOOD FRACAS
Mark Kurlansky
Bloombsbury, 2018

La leche en la historia humana

Un compendio cultural, científico y gastronómico de un alimento milenario

La leche ha formado siempre parte de los intereses de la sociedad. Se comentan las bondades de la leche materna en la alimentación del bebé. Se convierte en cuestión de primer orden en las negociaciones nacionales y supranacionales, como ocurre con las cuotas de producción. Entra en el debate sobre los derechos de los animales, en el de la leche cruda frente a la pasteurizada, en el de los alimentos ecológicos y un largo etcétera.

La producción de leche es lo que define a un mamífero. La clase *Mammalia*, a la que pertenecemos los humanos, se define por tener mamas. De acuerdo con el tipo de leche varía la concentración de lípidos, proteínas y lactosa que contiene. El bebé humano consume una leche con un 4,5 por ciento de grasas, un 1,1 por ciento de proteínas, un 6,8 por ciento de lactosa y un 87 por ciento de agua.

La lactosa, el azúcar de la leche, solo es digerible cuando en los intestinos se halla presente la lactasa, una enzima. Casi todos nacemos con lactasa; sin ella, el bebé no podría alimentarse del pecho de la madre. No deja de resultar irónico que la intolerancia a la lactosa constituya una condición natural de todos los mamíferos adultos, y que seamos los humanos los únicos que seguimos consumiendo leche tras el destete. Las crías de los demás mamíferos maman solo hasta que pueden consumir otro alimento, momento en el que se les activa un gen que afecta a la capacidad de digerir la leche. En los humanos, sin embargo, la ingesta de leche tiene una larga historia: hay testimonios de su consumo desde hace unos 10.000 años. Su importancia justificó que fuera también el primer alimento que entró en los laboratorios científicos. Hoy, además, se encuentra sometida a una regulación muy estricta en todos los países.

Esta es la historia que cuenta Mark Kurlansky en *Milk!*, una obra sobre la importancia cultural, económica y nutricional de uno de los alimentos más icónicos de nuestra especie.

La cultura ha venido incorporando en su acervo todo tipo de referencias a la leche y su significado. Nuestra galaxia se denomina Vía Láctea, y el propio término *galaxia* proviene del griego *gala*, «leche». De acuerdo con la mitología griega, la Vía Láctea se creó cuando la diosa Hera derramó su leche al retirarle de forma brusca el pecho a Heracles, hijo bastardo de Zeus con la mortal Alcmena. Cada gota se trocó en fuente de luz. El mito de la creación basado en la leche se halla muy extendido. El pueblo fulani, de África occidental, creía que el mundo surgió de una inmensa gota de leche. Y según una leyenda nórdica, en el comienzo hubo un ogro gigante congelado, de nombre Ymir, que era alimentado por una vaca. El animal presentaba cuatro ubres que abastecían sendos ríos de leche que daban sustento al mundo emergente.

En el Irak actual, donde floreció la cultura sumeria, habitaba uno de los primeros pueblos que domesticaron animales productores de leche. Según una leyenda, un sacerdote de nombre Shamash se dirigió a los animales y les persuadió para que extrajeran leche de la diosa Nidaba. Pero dos pastores hermanos descubrieron la conjura y arrojaron a Shamash al Éufrates, donde se transformó en una oveja. Descubierta la triquiñuela, volvieron a arrojarlo al río, pero se transformó en vaca. Reconocido, asumió en esta tercera ocasión forma de antílope. El mito evidenciaba la búsqueda de un animal productor de leche que fuera fiable.

Los egipcios del período faraónico presentaban en ofrenda ritual a los dioses de la leche y el vino los bienes más preciados del valle del Nilo. Isis, la diosa egipcia de la maternidad, dadora de vida, se representaba a menudo amamantando al faraón, mientras que Osiris, su esposo, era celebrado por derramar cuencos de leche, uno por cada día del año. A la diosa se la representaba con grandes pechos y cabeza de vaca y cuernos. Las imágenes de su contrapartida griega, Artemisa, portaban varias docenas de mamas.

Si se sorprendía ya Estrabón del consumo de leche en los celtas, no es menos cierto que hasta finales del siglo XVII se prolongó el miedo a los peligros que encerraba la práctica. La situación cambió en Europa y América cuando se introdujo de manera rutinaria la «alimentación artificial», que ofrecía a los bebés leche animal en botella, una medida que se conocía en la Edad Media y que se difundió por Italia, Alemania, Islandia, Escandinavia, Suiza y Austria. En algunos lugares, a los bebés alimentados con leche animal se les daba un suplemento de harina y agua.

Cuando Abraham Lincoln tenía siete años, su familia abandonó Kentucky para trasladarse a Little Pigeon Creek, una pequeña comunidad del sur de Indiana. Cumplidos apenas los nueve años, en 1818, murió su madre, Nancy Lincoln, de la «enfermedad de la leche», que afecta a quienes ingieren leche de una vaca que haya comido *Eupatorium urticifolium*, una asterácea. Aunque muy raro hoy, este trastorno se cobró entonces miles de vidas y llegó a diezmar varias comunidades del Medio Oeste y las Grandes Llanuras. La causa fue descubierta por la científica de la época Anna Pierce Hobbs Bixby.

A principios del siglo XIX, la ingesta de leche aumentó con el desarrollo de las ciudades. Fue allí donde sustituyó antes al amamantamiento. La fantasía popular se desató también. Se hablaba incluso de una «terapia de leche», de seis semanas de duración y con un consumo diario de un litro y medio. Pero a medida que la demanda de leche en las ciudades crecía, iba perdiendo calidad. Se crearon las primeras granjas de vacas estabuladas, junto a las destilerías, y surgieron nuevos problemas. Los residuos de las cervezas no eran adecuados para las vacas, que producían una leche acuosa y baja en lípidos, de un color azul celeste. A mediados del siglo, la mortandad infantil por leche en mal estado alcanzó al 50 por ciento de los niños nacidos en Manhattan.

La batalla definitiva no se ganaría hasta la intervención de Louis Pasteur, cuyas primeras investigaciones se centraron en

la cerveza y el vino. En 1848 descubrió el fenómeno del enantiomorfismo; esto es, el isomerismo especular que presentan ciertos compuestos químicos. Tres años más tarde, llegó a la conclusión de que todas las moléculas ópticamente activas tenían que ser asimétricas. Sus estudios le llevaron al descubrimiento de los agentes del ácido láctico, por el que reconoció la calidad de procesos vivos para los fenómenos de la llamada fermentación, concepto empleado desde el siglo XVII de una manera inespecífica. En 1857 presentó una memoria sobre la fermentación láctica en la que el azúcar de la leche se transformaba en ácido láctico.

En 1864 Pasteur descubrió lo que hoy llamamos pasteurización y lo aplicó primero al vino. El proceso consistía originalmente en elevar la temperatura y mantener el calor durante unos minutos para luego enfriarlo rápidamente. Tardó algún tiempo en aplicarlo a la leche. La pasteurización se convirtió en un asunto no solo médico, sino sobre todo de salud pública. Su teoría germinal de las enfermedades infecciosas tuvo una enorme repercusión en lecherías, salud pública y medicina en general. Pasteur atribuía a los microorganismos la causa de la enfermedad y de efectos como la fermentación. La teoría explicaba por qué enfermaban las personas, por qué las explotaciones lecheras insalubres eran origen de enfermedades, y por qué los productos lácteos fermentados, como el queso, no causaban males ni siquiera en tiempos de calor.

En sus libros de divulgación sobre la historia y la ciencia de alimentos, Kurlansky dedica amplio espacio a las recetas, tanto del pasado como del presente. Su interés reside en que compendian la importancia de determinadas preferencias e ingredientes en el transcurso de los siglos. Esos capítulos tienen el aroma de las viejas triacas con base científica.

—Luis Alonso



LA CIENCIA DE LA CIENCIA FICCIÓN
CUANDO HAWKING JUGABA AL PÓKER EN EL ENTERPRISE
Manuel Moreno Lupiáñez y Jordi José Pont
Shackleton Books, 2019

Los límites de lo real a través de la fantasía

De las meteduras de pata de Star Wars *a los aciertos de* Avatar

«El texto que tienen en sus manos pretende proporcionar elementos para la reflexión acerca del contenido técnico y científico de filmes y novelas encuadrados en ese género de límites difusos, y a menudo controvertidos, denominado ciencia ficción.» Con estas palabras introductorias, Manuel Moreno Lupiáñez y Jordi José Pont nos invitan a sumergirnos en esta deliciosa obra de 162 páginas.

El libro comienza explicándonos por qué la saga de *Star Wars* suspende estrepitosamente en credibilidad científica. Seguro que al lector le resultarán familiares algunos errores comunes y bien conocidos de las películas de ciencia ficción, como las inverosímiles duraciones de los viajes espaciales o los rayos de luz y sonidos de explosiones en las batallas espaciales. Pero seguro que otros deslices le resultarán menos conocidos y evidentes.

¿Son tan densos los cinturones de asteroides como se nos muestran en *El imperio contraataca* (1980) o *El despertar de la Fuerza* (2015)? ¿Se había percatado de que el planeta Tatooine tiene dos soles y, sin embargo, los objetos y personajes en pleno desierto arrojan solo una sombra? Cuestiones que los autores emplean, claro está, para hablarnos sobre cinturones de asteroides y planetas reales que orbitan alrededor de estrellas binarias. Porque esa es la idea: discutir sobre los límites de lo real a través de la fantasía (y también al revés). En todo caso, no me negarán que contrastar la Fuerza con las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza que conocemos es, además de simpático y original, un excelente ejercicio crítico. ¿Cómo argumentaría, querido lector, contra la afirmación de que es posible doblar cucharillas con la mente?

Tras el rapapolvo —aunque cariñoso— a *Star Wars*, los lectores descubrirán Pellucidar, túneles que atraviesan de cabo a rabo la Tierra o qué es la terraformación, y estimarán la aceleración que sufrirían los personajes de *De la Tierra a la Luna* (1865) en el lanzamiento que propone Verne. Pero ya desde el comienzo del segundo capítulo, dedicado a la gravedad, los autores despliegan otro de los encantos del libro: su sentido del humor. Comentando el filme *Planeta sangriento* (1966) dicen: «Quizá podríamos preguntarle al guionista el motivo de enviar dos astronautas a bordo de una nave de rescate... ¡biplaza!». Rescate que ocurre en el satélite marciano Fobos, donde, con una velocidad de escape de unos 11 metros por segundo, el lanzamiento de una moneda, que los protagonistas ejecutan para determinar quién no sube al biplaza, tardaría 49 minutos en subir y bajar.

A lo largo de toda la obra, los autores nos recomiendan una considerable cantidad de películas y novelas que han conseguido combinar espectáculo y buena ciencia, como el largometraje *2001: Una odisea en el espacio* (1968) o el libro *Misión de gravedad* (1954), por poner solo dos ejemplos. De igual modo, todo el libro se encuentra salpicado de cuadros donde los autores nos explican de manera sencilla los conceptos científicos fundamentales que se están analizando en el texto principal. Detalle que, junto al pequeño glosario del final, permite al lector con pocos conocimientos técnico-científicos seguir sin problemas los argumentos.

La parte dedicada a alienígenas y naves espaciales comienza con el film clásico *Ultimátum a la Tierra* (1951) para hablarnos de la barrera del sonido y estimar cuántas bombas atómicas como las de Hiroshima serían necesarias para destruir nuestro planeta. También desfilan la verosimilitud de los ojazos negros en forma de almendra de los extraterrestres,

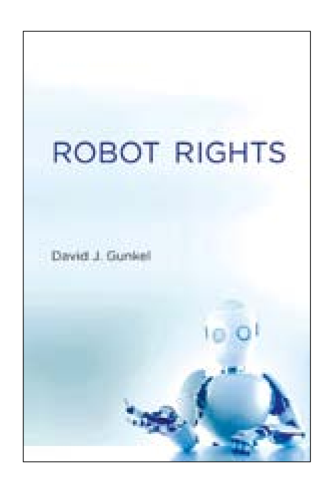
una elogiosa crítica a la ecología de *Avatar* (2009), un análisis de la posibilidad del teletransporte como nos aparece en *Star Trek*, o los agujeros de gusano en *Interstellar* (2014) [*véase* «El agujero negro convertido en estrella de cine», por Roberto Emparan; Investigación y Ciencia, septiembre de 2015].

El capítulo dedicado a gigantes como Godzilla, King Kong o el asombroso hombre colosal y la mujer de 15 metros de las películas homónimas resulta ser el más redondo. Nos explica las enormes implicaciones de una ley de escala tan sencilla como la ley cuadrático-cúbica ya enunciada por Galileo. ¿Cómo depende del tamaño de un organismo su velocidad para subir cuestas, su capacidad para volar o para comunicarse a una determinada frecuencia? Por supuesto, en el otro extremo no podían faltar *La mosca* (1958) ni *Viaje alucinante* (1966), que, unidos a los comentarios científicos de los autores, suponen una joya didáctica fruto de la dilatada, original y valiente experiencia de Moreno Lupiáñez y Pont como profesores del Departamento de Física de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La obra concluye con un recorrido por el siempre atractivo mundo de los superhéroes. Abunda en la cuestión de las escalas con *Ant-Man* (2015), vuelve a hacernos reír con el viaje del pequeño Superman desde Krypton a la Tierra, nos reporta un artículo de investigación titulado «Trajectory of a falling Batman», nos habla de las fuerzas de Van der Waals y de Spiderman, el material del escudo del Capitán América o los problemas de Flash con el rozamiento.

Hay que felicitar a la editorial Shackleton Books por evitar la pérdida de estas adaptaciones de artículos publicados por los autores en *Ciberp@ís* y *Tercer Milenio*, así como sus intervenciones radiofónicas en el programa *Extraradi*, de ComRadio. Y por supuesto, también a los propios autores por el esfuerzo de ordenar, poner al día y dar continuidad en forma de libro a este maravilloso material para un público general. Si los lectores no tienen suficiente —y apuesto a que no—, podrán leer también otras dos joyas de estos autores: *Física i ciència-ficció* (1994) y *De King Kong a Einstein*: *La física en la ciencia ficción* (1999), dos libros que aparecen referenciados en la breve pero exquisita bibliografía que cierra el libro.

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid



ROBOT RIGHTS
David J. Gunkel
MIT Press, 2018

¿Deberían tener derechos los robots?

Un estimulante análisis sobre una cuestión más relevante de lo que muchos piensan

Pensar lo impensable: este es el ejercicio mental que propone David J. Gunkel en su libro *Robot rights* sobre la controvertida cuestión de si los robots deberían tener derechos. Controvertida porque, a ojos de la mayoría de los expertos, se trata de una pregunta ociosa, risible o, en el mejor de los casos, demasiado prematura y por tanto no merecedora de consideración. La opinión generalizada de la comunidad robótica (científicos, ingenieros y fabricantes) es que hay otras cuestiones más urgentes a las que dedicar esfuerzos y recursos, incluso dentro del ámbito de la ética y la legislación.

Invariablemente, el robot es *objeto* pasivo o instrumental del dilema ético, nunca *sujeto*. Lo cual se traduce en que el robot no posea ningún derecho, aunque sea objeto de una disposición legislativa. El impacto que los robots están empezando a tener en las sociedades avanzadas, y que se verá notablemente acrecentado en los próximos años, hace que el debate ético sea inevitable, necesario y que implique a todos los actores, desde el científico y el tecnólogo hasta el usuario final, pasando por el fabricante, el programador y el legislador.

La presencia y las acciones de robots fuera de entornos controlados, como la industria o los laboratorios, plantea espinosas cuestiones relativas a la seguridad personal, la salvaguarda de la privacidad y la dignidad, el impacto ambiental y socioeconómico, etcétera. Las leyes, que regulan derechos y obligaciones, son el instrumento del que se dota la sociedad para proporcionar un contenido práctico y ejecutivo a los principios éticos de los que se derivan. Todas las iniciativas legislativas relativas a los robots abundan en aspectos que atañen a la responsabilidad civil de sus actos. Por ejemplo, la resolución del Parlamento Europeo del 16 de febrero de 2017, con recomendaciones sobre normas de derecho civil sobre robótica, contempla incluso «crear a largo plazo una personalidad jurídica específica para los robots, de forma que, como mínimo, los robots autónomos más complejos puedan ser considerados personas electrónicas responsables de reparar los daños que puedan causar, y posiblemente aplicar la personalidad electrónica a aquellos supuestos en los que los robots tomen decisiones autónomas inteligentes o interactúen con terceros de forma independiente». No obstante, dicha responsabilidad no conlleva la atribución de derechos a estas «personas electrónicas» [*véase* «Ética en la inteligencia artificial», por Ramon López de Mántaras; Investigación y Ciencia, agosto de 2017].

El libro de Gunkel trata todas estas cuestiones de forma metódica. Para empezar, expone las dificultades conceptuales de definir *robot* y *derechos*, y repasa las variantes de rechazo que despierta juntar ambos términos. El autor opta por una acepción flexible y polisémica de la palabra *robot*, en la que cabe tanto su naturaleza artificial como el paradigma percibe-piensa-actúa que caracteriza vagamente a dichas máquinas. El experto puede comulgar con esta vaguedad en la definición, que se convierte en certeza ante la máquina concreta: en palabras de Joseph Engelberger, el padre del robot

industrial, «no sabría definir robot, pero sé reconocer uno cuando lo veo».

En cuanto a la noción de derecho, el autor recurre a las incidencias hohfeldianas; esto es, a la categorización que hace un siglo estableció el jurista Wesley Hohfeld para la clasificación de derechos (pretensiones, libertades, poderes e inmunidades) con definiciones accesibles al lego en la materia. También se exponen dos teorías que abordan la cuestión sobre qué o quién puede ser titular de derechos: la volitiva (el potencial sujeto ha de ser capaz de reclamarlos para sí) y la de interés (tal reclamación es expresada por un sujeto de derecho para un tercero o un colectivo, como los animales no humanos o el entorno natural, por ejemplo). Todo este esfuerzo terminológico se traduce en la autocontención del texto, y dibuja un terreno de juego común para las diferentes disciplinas implicadas, los tecnólogos, los juristas y los filósofos.

El núcleo del libro se desarrolla en torno a dos afirmaciones: «los robots pueden tener derechos» y «los robots deberían tener derechos». A partir de ellas analiza sus negaciones y sus relaciones causales y adversativas, del tipo «los robots no pueden tener derechos y por tanto los robots no deberían tener derechos» (capítulo 2), o «aunque los robots no puedan tener derechos, los robots deberían tener derechos» (capítulo 5). En cada parte se exponen los argumentos de quienes abogan por la correspondiente sentencia, así como las dificultades y riesgos que se derivan de ella.

Cabe decir que este análisis se lleva a cabo con gran rigor y que es una experiencia intelectual gratificante por cuanto cuestiona ciertas ortodoxias interiorizadas de forma acrítica por su aparente obviedad. Simultáneamente, lejos de ser una exposición árida, está llena de ejemplos y anécdotas y no exenta de pasión, como cuando rebate los argumentos de Joanna Bryson («aunque los robots puedan tener derechos, no deberían tenerlos»), quien sostuvo provocativamente que «los robots deberían ser esclavos» en un ensayo homónimo de 2010 y en escritos posteriores. Por seguir con el ejemplo, en este caso Gunkel contrapone la compleja casuística legal asociada a los esclavos en la antigua Roma, así como el deterioro moral que supone para una sociedad estar basada en la esclavitud. Otra reflexión inquietante es la paradoja del consentimiento informado: ¿podemos (debemos) construir algo que luego pueda expresar su deseo de no haber sido construido?

Que el lector no espere acabar el libro con certezas absolutas. Aunque el autor aboga por la pertinencia de plantear la cuestión de los derechos de los robots, no acaba dando recetas. Pero sí nos proporciona algo mucho más valioso, que —aunque es una constante a lo largo del libro— desarrolla sobre todo en el último capítulo: el cuestionamiento de la relación de precedencia de la ontología sobre la ética, del *es* sobre el *debería*, en terminología de David Hume. Esta relación se tambalea precisamente por las dificultades de definir lo que *es* cuando se debaten términos como consciencia, sentiencia o vida confrontándolos al paradigma del robot inteligente; es decir, que trasciende la mera instrumentalidad [*véase* «¿Soy humano?», por Gary Marcus; Investigación y Ciencia, mayo de 2017]. Y lo hace a hombros de un gigante: el filósofo Emmanuel Lévinas, quien criticaba la tendencia de la filosofía occidental tradicional de búsqueda de lo esencial, reduciendo las diferencias y convirtiendo al *otro* en una modalidad de *lo mismo*.

A este procedimiento inclusivo, que para Lévinas es un acto de violencia etnocentrista ya que supone suprimir la diferencia, que es lo que precisamente caracteriza al otro, el filósofo contraponía la alteridad como vía de definición del ser: soy por el otro, porque contemplo el rostro del otro. Y si bien Lévinas nunca planteó la alteridad en otros términos que no fueran humanos, lo cierto es que Gunkel consigue hacer una relectura creíble de sus planteamientos ético-filosóficos para afrontar el rostro del robot y decidir, a partir de la interacción y no de prejuicios ontológicos, qué estatus legal estamos dispuestos a concederle.

Es un punto de vista lo suficientemente flexible como para amoldarse a la realidad presente y a la posible evolución futura de las máquinas inteligentes. Y aunque probablemente conduzca, durante bastante tiempo todavía, a no conceder un estatus legal diferente al que estemos dispuestos a otorgar a lo que sabemos o creemos que es un *simulacro* de ser inteligente o consciente, también deja espacio a la posibilidad de que, en algún momento, en algún futuro, contemplemos en el rostro del robot una alteridad dotada de inteligencia general y, en consecuencia, nos tengamos que plantear abrir un nuevo paraguas legal para ese nuevo ser.

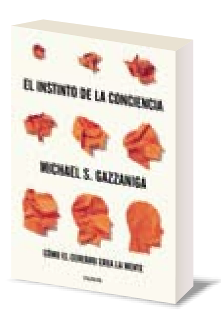
—Pablo Jiménez Schlegl
Instituto de Robótica e Informática Industrial (CSIC)

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



MARIE CURIE
Alice Milani
Nørdicalibros, 2019
ISBN: 978-84-17651-16-9
Novela gráfica
224 págs. (22,50 €)



EL INSTINTO DE LA CONCIENCIA
CÓMO EL CEREBRO CREA LA MENTE
Michael S. Gazzaniga
Paidós, 2019
ISBN: 978-84-493-3600-3
352 págs. (22,90 €)



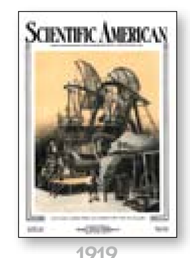
ANTROPOCÈ: LA FI D'UN MÓN
GUIA PER ENTENDRE COM ESTEM ALTERANT EL PLANETA
Daniel Closa
Angle Editorial, 2019
ISBN: 978-84-17214-72-2
192 págs. (15,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

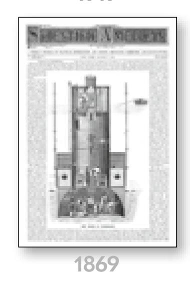
AGOSTO



1969



1919


1869

1969

Deriva genética

«La supervivencia y la multiplicación preferente de los mejor adaptados al entorno (selección natural) es la base de la evolución. Pero en ese proceso interviene otro tipo de variación tan independiente de la selección natural que incluso puede promover genes que no favorecen la adaptación. Conocida como deriva genética, se trata de una fluctuación aleatoria de la frecuencia con que un gen aparece en una población al pasar de una generación a la siguiente. En los últimos quince años, hemos estado investigando la deriva genética en las poblaciones del valle del río Parma, en Italia. Hemos examinado libros parroquiales y actas matrimoniales en los archivos vaticanos, revisado grupos sanguíneos, desarrollado teorías matemáticas, y, por último, hemos realizado simulaciones con ordenador de algunas de las poblaciones. Hemos descubierto que la deriva genética puede influir notablemente en la evolución.
—Luigi Luca Cavalli-Sforza»

Deriva continental

«Nuevas pruebas apoyan la idea de la deriva de los continentes. Walter Scroll y Robert S. Dietz, de los Laboratorios de Oceanografía Atlántica de la Dirección del Servicio de Ciencias Ambientales, han demostrado que la Antártida y Australia, hoy separadas por 2000 millas de océano, formaban hace tiempo una sola masa de tierra. Centrándose en la isobata de 1000 brazas (línea que contornea cada continente a esa profundidad), que ellos creen representa el auténtico borde de cada masa, introdujeron sus datos en una computadora de la Universidad de Miami hasta dar con el mejor encaje entre ambas.»

1919

Correo aéreo

«La entrega de correo a un barco en alta mar va a acometerla, en pocos días, C. J. Zimmerman, piloto experimentado que seguirá durante dos o tres horas al vapor *Adriático* tras haber zarpado este rumbo a Inglaterra, para adelantarlo y dejar caer al agua una saca de correo delante de su proa [*véase ilustración*]. Esta experiencia la seguirán de cerca las autoridades del servicio de correos y la tripulación del barco.»

La experiencia tuvo éxito, pero la técnica era peligrosa, comparada con la entrega regular del correo aéreo.

Aguas letales

«A los marinos que frecuentan la costa de Perú les es familiar un curioso fenómeno, conocido como el "pintor", que se produce sobre todo en el puerto del Callao, junto a Lima. El agua se tiñe y desprende un olor repugnante, debido al parecer al sulfuro de hidrógeno. La pintura blanca de las embarcaciones se cubre de un limo achocolatado. En un documento recién presentado a la Sociedad Geográfica de Lima, J. A. de Lavalle y García concluye que la causa fundamental es el movimiento estacional de las corrientes marinas, cuando la contracorriente ecuatorial cálida desplaza a la corriente peruana fría. Según él, el consiguiente cambio en la temperatura del agua destruiría una gran cantidad de plancton, y la putrefacción de esa materia orgánica provocaría el fenómeno observado.»

El escaso oxígeno de las aguas de El Niño asfixia a muchos organismos.



UN HIDROAVIÓN entrega correo a un vapor durante la travesía, 1919.

1869

El horno solar

«Los materiales de nuestro Sol son sin duda capaces de producir, en proporción, más calor que las sustancias que solemos emplear para el mismo fin. Investigaciones químicas recientes indican que la materia de estrellas y nebulosas se halla en un estado más elemental que cualquiera de los estados que nos son conocidos en la Tierra. ¿Quién puede negar que la creación de nuestros elementos terrenales estuvo acompañada de estampidos de luz y calor de intensidad similar a los que ahora presenciamos en el Sol y las estrellas? Esta teoría está fuertemente respaldada por la incesante acumulación de pruebas que la espectroscopia nos proporciona.»

Economía del carbón

«Todos convienen en que el carbón es abusivamente caro; pero no todos concuerdan sobre la causa del alto precio ni en cómo podría abaratarse. Los librecambistas achacan el elevado precio al actual arancel, mientras que los proteccionistas culpan a los fletes abusivos y a los altos precios que exigen los mineros. Para nosotros se trata de una combinación de las causas apuntadas. Necesitamos nuevas líneas de transporte competitivas desde los grandes yacimientos hasta los principales centros de comercialización, y precisamos más mano de obra; en nuestra opinión, la insuficiente mano de obra adecuada es una de las principales causas del problema. Esta puede hallarse en abundancia en Asia. Solo espera a ser debidamente invitada.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXI, N.º 8, 23 DE AGOSTO DE 1919



NEUROCIENCIA
Las redes de la inteligencia
Max Bertolero y Danielle S. Bassett

La neurociencia de redes estudia la emergencia de las capacidades cognitivas a partir de las conexiones neuronales.



BOTÁNICA
Las micorrizas conquistan la tierra firme
Marc-André Selosse

Sin los hongos, las plantas que conocemos no existirían. A cambio de productos de la fotosíntesis, proveen de nutrientes y protegen a los vegetales. Esta simbiosis se encuentra en el origen de los ecosistemas terrestres actuales.

FÍSICA
El universo como obra de arte
Manon Bischoff y Robert Gast

Frank Wilczek, uno de los físicos más influyentes de la actualidad, habla en esta entrevista sobre la estética de las leyes naturales, la materia oscura y un elusivo tipo de partículas exóticas.



BIOLOGÍA
La vida social de los papiones de Amboseli
Lydia Denworth

Los estrechos lazos que estos primates entablan parecen ser de ayuda para vencer las adversidades de la infancia. Ello podría inspirar nuevas estrategias de salud pública.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; José Óscar Hernández Sendín: *La basura espacial se amontona*; Fabio Teixidó: *Reinventar el combustible nuclear* y *Viene mal tiempo*; Pedro Pacheco González: *El auge de los animales*; Alberto Ramos Martínez: *El último secreto del átomo*; Anna Romero: *Insectos palo que se hacen notar*; Xavier Roqué: *Las mujeres de la tabla periódica*; Luis Cardona: *Los últimos océanos inalterados*; A. Garcimartín: *El calor a escala nanométrica*; Elisa Vilaret: *Reinventar las vacunas*; Ana Mozo García: *Los otros efectos de la cirugía bariátrica*; J. Vilardell: *Ondas cobra con palillos* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España